



TUGAS AKHIR - TF 141581

***HAZARD AND OPERABILITY STUDY BERBASIS
LAYER OF PROTECTION ANALYSIS PADA
TURBIN UAP 105-JT DI PABRIK 1 (AMONIA)
PT. PETROKIMIA GRESIK***

**AGUNG SETIAWANTO
NRP. 2412 100 058**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - TF 141581

***HAZOP AND OPERABILITY STUDY BASIC ON LAYER
OF PROTECTION ANALYSIS METHOD ON STEAM
TURBINE 105-JT IN AMMONIA FACTORY PT.
PETROKIMIA GRESIK***

**AGUNG SETIAWANTO
NRP. 2412 100 058**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

**HAZARD AND OPERABILITY STUDY BERBASIS
LAYER OF PROTECTION ANALYSIS PADA
TURBIN UAP 105-JT DI PABRIK 1 (AMONIA)
PT. PETROKIMIA GRESIK**

**TUGAS AKHIR
OLEH**

AGUNG SETIAWANTO
NRP. 2412 100 058

Surabaya, 13 Januari 2017

**Mengetahui,
Dosen Pembimbing**

Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.
NIP. 19690530 199412 1 001



**Menyetujui,
Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS**

Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph. D
NIPN. 19780902 200312 1 002

**HAZARD AND OPERABILITY STUDY BERBASIS
LAYER OF PROTECTION ANALYSIS PADA TURBIN UAP
105-JT DI PABRIK 1 (AMONIA) PT. PETROIMIA GRESIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Instrumentasi
Program Studi S-1 Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AGUNG SETIAWANTO

NRP. 2412 100 058

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| 1. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. | (Pembimbing I) |
| 2. Ir. Ya'umar, M.T. | (Penguji I) |
| 3. Dr. Ir. Syamsul Arifin, M.T. | (Penguji II) |
| 4. Detak Yan Pratama, S.T., M.TSc | (Penguji III) |

**SURABAYA
JANUARI, 2017**

**HAZARD AND OPERABILITY STUDY BERBASIS
LAYER OF PROTECTION ANALYSIS PADA
TURBIN UAP 105-JT DI PABRIK 1 (AMONIA)
PT. PETROKIMIA GRESIK**

Nama : Agung Setiawanto
NRP : 2412100058
Jurusan : Teknik Fisika FTI ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

Abstrak

Kebutuhan pangan merupakan kebutuhan Nasional yang sangat penting bagi Indonesia. Kebutuhan pangan akan tersedia apabila ditopang dengan industri pupuk yang kuat. Untuk itu dilakukan penelitian untuk menentukan kemungkinan risiko serta bahaya dari kegagalan proses pada mesin uap 105-JT milik PT. Petrokimia Gresik. Serta bertujuan untuk meningkatkan nilai *safety integrity level* untuk mereduksi setiap kemungkinan bahaya. Dari hasil analisa HAZOP didapatkan bahwa kegagalan dengan risiko tertinggi adalah kegagalan yang disebabkan oleh tidak berfungsinya governor valve dengan baik ditambah keausan yang terjadi pada komponen bearing dan nozzle. Ketiganya dikategorikan dalam risiko tinggi dengan nilai H 15. Dari hasil analisa proses reduksi risiko pada 105-JT dengan menggunakan metode LOPA maka didapatkan hasil rekomendasi bahwa perlu ditambahkan adanya *Speed Alarm Low Low* (SALL) pada proses yang berkaitan dengan governor yang memiliki nilai PFD avg= 0,28571. Serta rekomendasi untuk menambahkan *loop* pengendali temperatur dan *Temperature Alarm High High* pada kasus temperatur dan vibrasi tinggi yang terjadi.

Kata kunci: *Safety*, SIL, HAZOP, LOPA

**HAZARD AND OPERABILITY STUDY BASIC ON LAYER
OF PROTECTION ANALYSIS METHOD ON STEAM
TURBINE 105-JT IN AMMONIA FACTORY
PT. PETROKIMIA GRESIK**

Name : Agung Setiawanto
NRP : 2412100058
Department : Engineering Physics ITS
Advisor : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

Abstract

Food needs is a very important National requirement for Indonesia. Food needs can be provided with the help of the stronger fertilizer industry. Therefore, will be researched the possible risks and dangers of failure in the steam turbine in PT. Petrokimia, and aims to determined the value of SIL and necessary the possibility of hazard and risk reduction. From the result of HAZOP obtained the failure event with the level with the highest risk of failure is caused by malfunction of the governor valve and the worn-out that occurs on the bearing and nozzle components, with the category of high risks are H15. And from the analysis result of LOPA method obtained recommendation to added a Speed Alarm Low Low in governor process, wich the PFD avg is 0,28571. And recommendation to added a temperature contol loop with a TAHH in the problem of over temperature and over vibration.

Keywords: *Safety, SIL, HAZOP, LOPA*

KATA PENGANTAR

Bismillaahi was sholaatu was salaamu ‘alaa Rasuulillaah. Alhamdulillahilladzii bini’matihi tatimmush-shaalihaat, Segala puji bagi Allah Subhanahu wa Ta’ala atas Berkah, Rahmat dan Nikmat-Nya yang senantiasa tercurahkan kepada hamba, sehingga dapat menyelesaikan laporan tugas akhir Program Studi S1 Teknik Fisika ITS. Pada tugas akhir ini diambil judul *HAZARD AND OPERABILITY STUDY BERBASIS LAYER OF PROTECTION ANALYSIS* PADA TURBIN UAP 105-JT DI PABRIK 1(AMONIA) PT. PETROKIMIA GRESIK.

Selama menyelesaikan Tugas Akhir ini penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua yang selalu memberikan dukungan do’a dan tambahan semangat.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
3. Bapak Ir. Heri Joestiono, MT, selaku dosen wali penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa’, M.Sc., selaku pembimbing tugas akhir penulis.
5. Bapak Angga Saputra, S.T., selaku pembimbing lapangan, terimakasih atas waktu, kesempatan, serta bimbingan yang diberikan kepada penulis sehingga dapat mengambil dan mengolah data di PT. Petrokimia Gresik.
6. Mas Riza Baihaqi, atas segala keluangan waktu serta ilmu yang diberikan. Handik Y, Ilham Rimsky dan Amarendra B yang rela banyak tersita waktunya untuk menanggapi konsultasi penulis.

Saya ucapkan Jazaakumullaahu Khairan atas segala bantuannya. Kritik dan saran juga diharapkan penulis agar senantiasa menjadi acuan untuk memperbaiki diri.

Surabaya, 13 Januari 2017

Penulis,

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 <i>Steam Turbine 105-JT</i>	5
2.2 Keandalan (<i>Reliability</i>)	9
2.3 <i>Hazard and Operability Study (HAZOP)</i>	16
2.5 <i>Safety Integrity Level</i>	20
2.6 <i>Layer of Protection Analysis</i>	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Diagram Alir Penelitian	27
3.2 Tahap-Tahap Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Alur Proses pada <i>Steam Turbine 105-JT</i>	33
4.2 Keandalan Sistem.....	34
4.3 Analisis Risiko	39
4.4 Analisis Potensi, Penyebab dan Akibat Bahaya.....	50
4.5 Analisis HAZOP	65
4.6 <i>Layer of Protection Analysis</i>	66
BAB V PENUTUP	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran	73

DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen Turbin Uap 105-JT	5
Gambar 2.2	P&ID <i>Loop</i> Pengendalian Proses pada 105-JT	8
Gambar 2.3	Grafik Distribusi Normal	11
Gambar 2.4	Grafik Distribusi Lognormal	13
Gambar 2.5	Grafik Distribusi Weibull 2-parameter	14
Gambar 2.6	Grafik Distribusi Eksponensial	15
Gambar 2.7	Diagram Blok Susun Seri	15
Gambar 2.8	Diagram Blok Susun Paralel	16
Gambar 2.9	<i>Layer of Protection</i>	23
Gambar 2.10	Tingkat Bahaya Tiap <i>Layer</i>	26
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	27
Gambar 4.1	Grafik Distribusi <i>Loop</i> 1009	35
Gambar 4.2	Grafik Distribusi <i>Loop</i> 1020	36
Gambar 4.3	Rangkaian Instrumentasi Seri pada 105-JT	36
Gambar 4.4	Grafik <i>Reliability</i> Terhadap Waktu	39
Gambar 4.5	P&ID <i>Steam Turbine</i> 105-JT	41
Gambar 4.6	Grafik <i>Logsheet</i> PT 1009	42
Gambar 4.7	Grafik <i>Logsheet</i> PT 1016	43
Gambar 4.8	Grafik <i>Logsheet</i> SI 1005	45
Gambar 4.9	Grafik <i>Logsheet</i> TI 1754	47
Gambar 4.10	Grafik <i>Logsheet</i> TI 1811	49
Gambar 4.11	<i>Evaluation and Recommendation Flowchart</i>	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Guide Word</i> HAZOP	17
Tabel 2.2	Parameter Proses Analisa HAZOP	18
Tabel 2.3	<i>Risk Matriks</i>	20
Tabel 2.4	Kategori Nilai SIL.....	21
Tabel 2.5	<i>Target Mitigated Event Likelihood</i>	22
Tabel 3.1	Klasifikasi Dampak Risiko.....	30
Tabel 3.3	Klasifikasi <i>Likelihood</i>	30
Tabel 3.4	<i>Standard of LOPA Report</i>	31
Tabel 4.1	Perhitungan <i>Reliability</i> Sistem 105-JT.....	37
Tabel 4.2	<i>Guide Word</i> dan Deviasi PT 1009.....	43
Tabel 4.3	<i>Guide Word</i> dan Deviasi PT 1016.....	44
Tabel 4.4	<i>Guide Word</i> dan Deviasi SI 1005.....	45
Tabel 4.5	<i>Guide Word</i> dan Deviasi TI 1754.....	48
Tabel 4.6	<i>Guide Word</i> dan Deviasi TI 1811.....	50
Tabel 4.7	<i>Causes and Consequences</i>	51
Tabel 4.8	Kriteria <i>Likelihood Node Steam Turbine</i> 105-JT	59
Tabel 4.9	Standar <i>Likelihood</i> Perusahaan	59
Tabel 4.10	Kategori Konsekuensi	60
Tabel 4.11	<i>Risk Ranking Category</i>	61
Tabel 4.12	<i>Risk Ranking Consequences</i>	62
Tabel 4.13	Hasil ICL	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk republik Indonesia dari tahun ke tahun menyebabkan meningkatnya kebutuhan pangan di Indonesia. Kebutuhan pangan merupakan kebutuhan nasional yang sangat penting mengingat peranannya dalam menjaga stabilitas negara serta kaitannya dengan penanggulangan kemiskinan di Indonesia. Kebutuhan pangan nasional Indonesia ditopang salah satunya dengan industri pupuk yang kuat. Salah satu faktor penting guna mendukung tercapainya kondisi kuatnya industri pupuk yang tersebut adalah dengan adanya peningkatan keandalan dari setiap *equipment* dan *instrument* yang bekerja pada industri tersebut. Karena itu perusahaan harus senantiasa melakukan perawatan secara berkala dan terstruktur, serta berfikir bagaimanakah langkah untuk meningkatkan tingkat keamanan (*safety*) perusahaan terhadap ancaman kegagalan proses.

PT. Petrokimia Gresik merupakan salah perusahaan berskala besar yang bergerak dalam produksi pupuk (pupuk nitrogen dan fosfat) dan non-pupuk (*ammonia*). Pada pabrik 1(amonia) di PT. Petrokimia Gresik terdapat salah satu komponen utama yakni mesin *steam turbine* 105-JT. Mesin tersebut berfungsi sebagai penggerak kompresor 105 JLP dan kompresor 105 JHP. Pada proses *refrigerant compressor* 105-J memiliki empat tahap sistem pendinginan amonia yang bertujuan untuk menghasilkan amonia dingin dan amonia panas sekaligus mengkondensasi amonia dalam sintesis *loop*, gas buang dan mendinginkan gas pada *interstage compressor* gas sintesa. Empat tingkat pendinginan beroperasi pada temperatur 13°C, -1°C, -12°C dan -33°C. Sistem pendingin terdiri dari dua *case* kompresor sentrifugal dengan dua *intercooler* 128-C dan 167 C, *refrigerant condenser*, *refrigerant receiver* , katup ekspansi dan *refrigerant flush drum* 120 CF.

Dengan peranannya yang begitu krusial pada proses tersebut, akibatnya apabila *steam turbine* 105-JT mengalami trip maka

keseluruhan proses pada pabrik 1 (amonia) akan mati. Hal ini juga diperparah dengan kondisi tidak adanya mesin turbin uap redundan sebagai antisipasinya.

Rencana tugas akhir ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi berdasarkan perhitungan SIL dengan metode *Layer of Protection Analysis* (LOPA) dan penilaian resiko dengan analisis *Hazard and Operability Study* (HAZOP) untuk mencapai keselamatan kerja dari suatu industri proses. Objek yang akan dianalisis terkait risiko dan nilai SIL adalah *Steam Turbine* 105-JT di pabrik 1 PT. Petrokimia Gresik.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana melakukan analisis bahaya dengan menggunakan metode HAZOP pada mesin *Steam Turbine* 105-JT?
2. Bagaimana menentukan nilai *Safety Integrity Level* (SIL) dengan menggunakan metode LOPA?
3. Bagaimana memperbaiki nilai *Safety Integrity Level* (SIL) pada mesin *Steam Turbine* 105-JT?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk melakukan analisis bahaya dengan menggunakan metode HAZOP pada *Steam Turbine Machine* 105-JT.
2. Untuk menentukan nilai *Safety Integrity Level* (SIL) dengan menggunakan metode LOPA.
3. Untuk memperbaiki nilai *Safety Integrity Level* (SIL) pada Mesin *Steam Turbine* 105-JT.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya permasalahan, maka diperlukan batasan masalah sebagai berikut :

1. *Plant* yang digunakan adalah Mesin *Steam Turbine* 105-JT pada pabrik 1 (amonia) PT. Petrokimia Gresik.
2. Analisa bahaya menggunakan metode HAZOP.

3. Analisis SIL dengan metode LOPA.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bab I Pendahuluan

Berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan hingga batasan masalah dan sistematika laporan.

2. Bab II Dasar Teori

Berisi tentang teori yang berhubungan dengan proses *Steam Turbine* 105-JT, analisis HAZOP, *Layer of Protection Analysis* (LOPA), serta perhitungan SIL dengan LOPA.

3. Bab III Metodologi Penelitian

Berisi tentang metode serta urutan langkah-langkah dalam pengerjaan penelitian dan pengolahan data.

4. Bab IV Analisis Data dan Pembahasan

Berisi tentang evaluasi *hazard* menggunakan metode HAZOP dan menentukan *hazard* dengan kategori *high risk*, serta menghitung nilai SIL dengan LOPA ditambahkan dengan rekomendasi guna meningkatkan nilai SIL.

5. Bab V Penutup

Berisi tentang hasil penelitian, kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, serta saran sebagai bentuk keberlanjutan dan pengembangan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

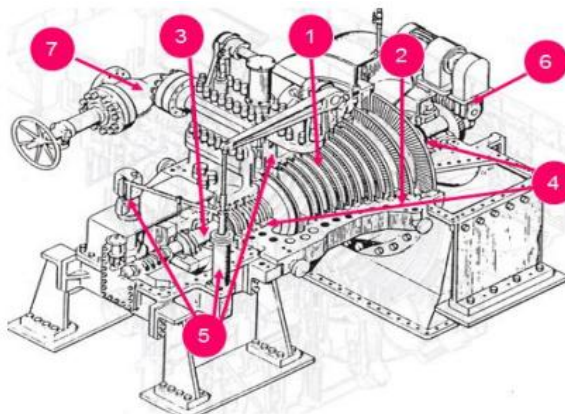
BAB II DASAR TEORI

2.1 *Steam Turbine 105-JT*

Steam Turbine 105-JT merupakan salah satu turbin uap yang digunakan oleh perusahaan pupuk PT. Petrokimia Gresik, di Pabrik 1 pada proses produksi amonia. Fungsi dari komponen 105-JT adalah sebagai penggerak kompresor 105 JLP dan kompresor 105 JHP. Kedua kompresor ini digunakan sebagai *refrigerant compressor* pada proses refrigerasi NH₃ yang mempunyai fungsi untuk memenuhi kebutuhan tekanan pada proses distribusi fluida NH₃ pada *Stage Flush Drum* (120 CF). Kedua komponen ini juga biasa disebut *ammonia refrigerant compressor 105 J*. Turbin 105-JT digerakkan oleh uap ekstraksi dari HP Turbine (101-JT dan 103-JT) yang berupa *medium pressure steam* serta didukung oleh produksi uap regenerasi yang dihasilkan oleh *Waste Heat Boiler*.

Spesifikasi 105-JT adalah sebagai berikut (Mitsubishi, 1994):

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| a. <i>Manufacture</i> | :MitsubishiHeavyIndustry |
| b. <i>Service</i> | : <i>Refrigerant Compressor</i> |
| c. <i>Turbine item</i> | : 105-JT |
| d. <i>Turbine model</i> | : 5MXL-6 |



Gambar 2.1 Komponen Turbin Uap 105-JT (Mitsubishi, 1994)

Gambar 2.1 di atas menunjukkan gambaran komponen-komponen utama penyusun mesin *Steam Turbine* 105-JT, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. *Rotor*: bagian dari turbin yang berputar pada porosnya. Rotor dilengkapi sudu-sudu pada proses kerjanya. Sudu/ blade pada turbin berfungsi untuk menerima dan mengarahkan kemana *steam* selanjutnya akan masuk (*stationary blade*) dan juga berfungsi untuk mengubah energi yang ada pada *steam* menjadi bentuk energi kinetik yang akhirnya memutar poros turbin (*moving blade*).
2. *Casing*: bagian dari badan turbin yang berfungsi untuk mengarahkan fluida masuk ke dalam turbin. Fungsi lain dari casing ini mengurangi efek vibrasi dan kebisingan yang terjadi ketika turbin uap sedang melakukan proses ekspansi, serta melindungi bagian-bagian dalam turbin dari gangguan luar.
3. *Bearing*: komponen mekanik yang berfungsi untuk menyokong dan menerima beban radial serta gaya aksial yang akan muncul pada poros turbin baik ketika *start up* maupun ketika proses telah berjalan dengan normal. Selain fungsi tersebut, bearing juga berguna untuk menahan berat dari rotor serta menahan ketidakseimbangan (*unbalance*) apabila terdapat kerusakan pada sudu-sudu turbin.
4. *Labyrinth*: komponen penyusun turbin yang berfungsi untuk menurunkan *pressure* dari *steam* yang masuk ke turbin uap. Selain fungsi tersebut fungsi lain *labyrinth* adalah sebagai penyekat untuk menahan kebocoran uap maupun kebocoran oli.
5. *Turning Gear*: perangkat Turbin Uap yang berfungsi untuk memutar rotor Turbin pada putaran rendah (5–10 rpm) yang fungsinya adalah untuk menjamin pemanasan/ pendinginan rotor yang merata sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya bengkok pada rotor ketika proses *start up* maupun proses trip atau *shutdown* pada turbin uap 105-JT. Selain itu *Turning Gear* juga mempunyai fungsi lain yaitu memberikan gerak awal pada saat turbin *start up* sehingga

dapat mengurangi gesekan statis pada bantalan (*Bearing Turbin*).

6. *Sealing*: berfungsi untuk mencegah *steam* yg sedang diekspansi keluar atau lolos melalui celah-celah antara *casing* dan poros turbin akibat adanya perbedaan tekanan.
7. *Governing system*: suatu rangkaian sistem yang berguna untuk mengontrol putaran *steam turbine* dengan mengatur jumlah aliran *steam* yang masuk ke dalam turbin, atau dengan mengatur besarnya bukaan dari katup *governor*.

Untuk menjaga serta mengontrol operasi kerja turbin maka pada komponen mesin *steam turbine* dilengkapi dengan beberapa instrumen pengendalian, baik yang berupa *process control* maupun *safety control*.

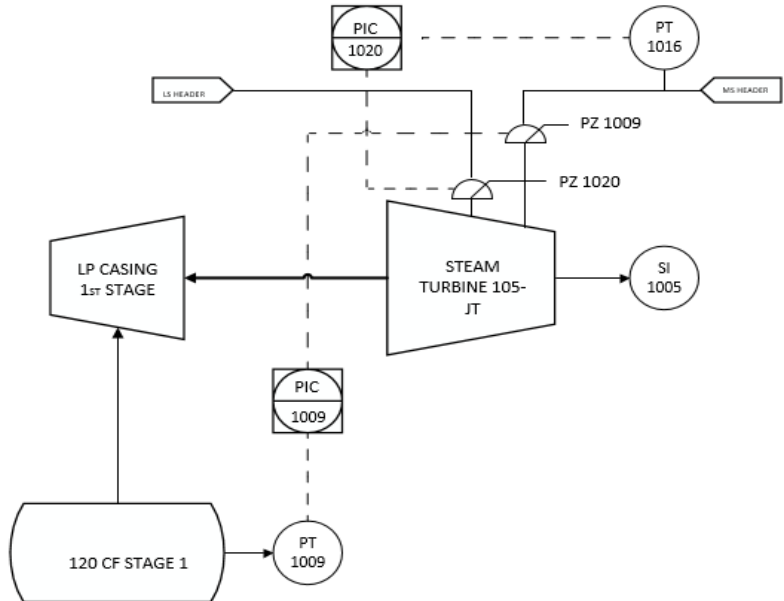
Adapun *instrument control* yang digunakan pada steam turbine 105-JT untuk mengontrol jalannya proses produksi amonia atau *process control* antara lain :

1. *Governor Valve Assembly*

Governor valve berfungsi sebagai pengatur kecepatan putar rotor turbin uap 105-JT. Governor adalah sebuah instrumen aktuator berupa *valve* yang berfungsi untuk mengatur besar kecilnya masukan *steam* yang akan menuju ke *steam turbine* 105-JT, dari besar kecilnya jumlah *steam* yang masuk tersebut governor mengontrol kecepatan putar poros turbin. Besar kecilnya bukaan pada valve PZ 1009 akan ditentukan oleh besar kecilnya tekanan pada *flash drum* 120 CF.

2. *Admission Valve Assembly*

Admission valve merupakan instrumen kontrol yang berfungsi untuk menambahkan jumlah *steam* pada *steam turbine* 105-JT. Dimana PZ 1020 akan terbuka melalui sinyal kontrol yang dikirimkan oleh PIC 1020 berdasarkan besarnya *pressure* yang terbaca oleh PT 1016 pada pipa *MS Steam Header*.



Gambar 2.2 P&ID Loop Pengendalian Proses pada 105-JT

Selain 2 buah loop pengendalian proses tersebut, pada mesin *steam turbine* 105-JT juga dilengkapi sistem instrumentasi berupa *safety control* yang berupa *Trip Throttle Valve*.

3. Trip Throttle Valve

TTV adalah sebuah katup yang berada pada *line steam* menuju *governor valve* dan *admission valve* yang berfungsi untuk mentripkan *steam turbine plant* apabila terdapat indikasi kegagalan pada proses Turbin dan Kompresor. Indikasi yang digunakan TTV dalam mengambil keputusan adalah *speed indicator* yang terletak pada *steam turbine* 105-JT (SI 1005). Yang mana SI 1005 merupakan sebuah elemen sensor yang memonitoring kecepatan putar poros tubin setiap saat. Jika terdapat indikasi bahwa level speed pada SI 1005 mencapai kondisi HH (*high-high*) maka seketika itu juga *Trip Throttle Valve* akan bekerja dengan menutup aliran steam menuju *governor valve*.

2.2 Keandalan (*Reliability*)

Menurut Ebeling (1997), keandalan merupakan peluang suatu sistem atau komponen berjalan dengan fungsi yang diharapkan selama periode waktu tertentu dengan kondisi operasi tertentu. Sedangkan menurut Leitch (1995), keandalan didefinisikan sebagai ukuran terhadap kemampuan komponen atau sistem tersebut untuk melakukan fungsinya pada saat dibutuhkan pada waktu dan kondisi tertentu. Dari definisi tersebut didapatkan bahwa keandalan suatu sistem akan berpengaruh terhadap aktivitas proses pada sistem, bagaimanakah efisiensi serta hasil produksi pada *plant*.

Formula yang digunakan untuk menghitung nilai keandalan suatu sistem adalah sebagai berikut (Ebeling, 1997) :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

$F(t)$ = *Cumulative Distribution Function* (CDF)

$R(t)$ = *Reliability Function*

$f(t)$ = *Probability Density Function* (PDF)

2.2.1 Laju Kegagalan (*Failure Rate*)

Laju kegagalan atau *failure rate* (λ) adalah ukuran besarnya nilai kegagalan yang terjadi per satuan waktu. Dimana laju kegagalan dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara banyaknya kegagalan yang terjadi dalam selang waktu tertentu terhadap total waktu operasi komponen atau sistem. Laju kegagalan juga dapat merepresentasikan seberapa sering suatu sistem atau komponen tersebut mengalami kegagalan atau kerusakan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan laju kegagalan adalah sebagai berikut (Ebeling, 1997) :

$$\lambda(t) = \frac{f}{T} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

f = banyaknya kegagalan selama jangka waktu operasi

T = total waktu operasi komponen/ sistem

2.2.2 Distribusi Kegagalan

Distribusi kegagalan merupakan sebuah grafik sebaran yang menggambarkan kemungkinan/ probabilitas kegagalan dari suatu komponen atau sistem. Distribusi kegagalan didapatkan melalui data TTF (*Time To Failure*) sebuah komponen atau sistem, data TTF bisa didapatkan dengan menganalisa data *maintenance* yang dimiliki perusahaan untuk tiap-tiap komponen. Dari data *maintenance* tersebut maka akan bisa dilihat kapan waktu rusak sebuah komponen dan kapan pula waktu setelah perbaikannya selesai dilakukan. Sehingga didapatkan TTF adalah selisih waktu antara waktu kerusakan berikutnya dengan waktu perbaikan pada kerusakan yang satu.

Parameter yang didapat dari analisa distribusi data yang digunakan adalah antara lain untuk menentukan MTTF dan *reliability* dari suatu komponen atau sistem tersebut. Dari data MTTF akan dihasilkan nilai *likelihood* komponen atau sistem. Yakni sebuah tingkat kejadian kegagalan berdasarkan nilai MTTF sepanjang kurun waktu operasi sistem atau komponen tersebut.

Berikut adalah formula yang digunakan untuk mendapatkan MTTF suatu komponen atau sistem (Ebeling, 1997) :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \dots\dots\dots (2.4)$$

$$likelihood = \frac{waktu\ operasi\ (jam)}{MTTF\ (jam)} \dots\dots\dots (2.5)$$

MTTF (*Mean Time to Failure*) = rata-rata selang waktu antara kegagalan yang satu dengan kegagalan lainnya

Di bawah ini merupakan jenis-jenis distribusi kegagalan yang umumnya digunakan untuk analisis keandalan suatu sistem atau komponen :

a. Distribusi Normal

Ebeling (1997) mengatakan bahwa distribusi *normal* atau yang sering disebut distribusi gaussian merupakan jenis distribusi yang tepat apabila digunakan dalam menjelaskan *model fatigue* dan *wearout phenomena*. Berikut merupakan

persamaan untuk menentukan *Probability density function* pada distribusi normal (Ebeling, 1997) :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

t = waktu (variabel)

μ = rata-rata data

σ = simpangan baku

Bila distribusi kegagalan suatu sistem menunjukkan distribusi *normal*, maka fungsi keandalan, laju kegagalan serta MTTF dari sistem tersebut adalah sebagai berikut :

- Fungsi *Reliability* $R(t)$:

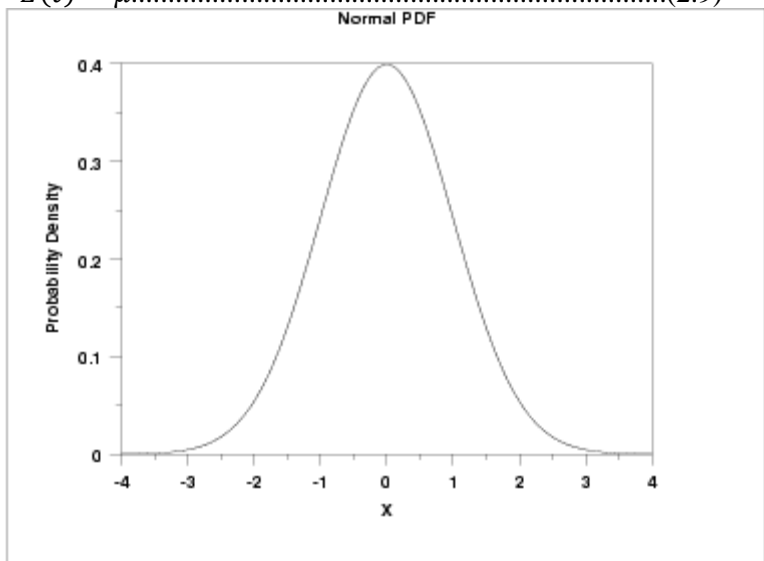
$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \dots\dots\dots(2.7)$$

- Laju Kegagalan $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots\dots(2.8)$$

- MTTF $E(t)$ (Leitch, 1995) :

$$E(t) = \mu \dots\dots\dots(2.9)$$



Gambar 2.3 Grafik Distribusi Normal (SEMATECH, 2012)

b. Distribusi Lognormal

Distribusi ini juga disebut sebagai distribusi Galton. Distribusi Lognormal merupa distribusi dari suatu variabel acak yang apabila dilogaritmakan akan berdistribusi normal. Suatu variabel dapat dimodelkan menjadi suatu bentuk lognormal apabila ia merupakan hasil perkalian dari banyak variabel acak positif yang saling bebas (untuk kondisi yang bervariasi) (Anshori & Mustajib, 2013).

Parameter yang dimiliki distribusi lognormal sama seperti yang dimiliki oleh distribusi normal. Berikut merupakan persamaan untuk mencari *Probability density function* sistem (Ebeling, 1997) :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

t = waktu (variabel)

μ = rata-rata data

σ = simpangan baku

Bila didapatkan distribusi kegagalan suatu sistem menggunakan distribusi lognormal, maka keandalan dan *failure rate*, serta MTTF sistem adalah sebagai berikut :

- Fungsi *Reliability* R(t) :

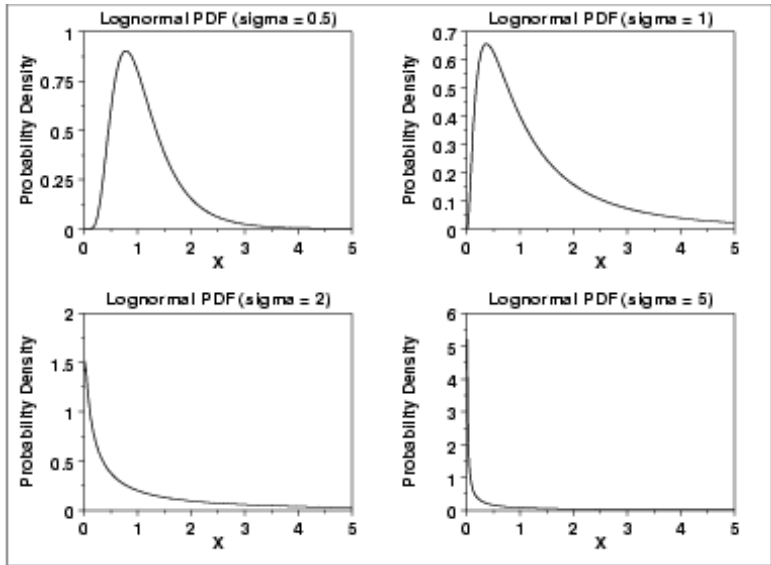
$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right) \dots\dots\dots(2.11)$$

- Laju Kegagalan $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots\dots(2.12)$$

- MTTF E(t) (Leitch, 1995) :

$$E(t) = e^{(\mu + \frac{\sigma^2}{2})} \dots\dots\dots(2.13)$$



Gambar 2.4 Grafik Distribusi Lognormal (NISMATECH, 2012)

c. Distribusi Weibull

Probability density function dari distribusi weibull dapat dicari dengan persamaan berikut (Leitch, 1995) :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \dots \dots \dots (2.14)$$

untuk distribusi weibull 3-parameter. Sedangkan untuk distribusi weibull 2-parameter maka memiliki nilai $\gamma=0$, sehingga persamaannya akan berupa seperti di bawah ini :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

- t = waktu (variabel)
- β = bentuk parameter (*shape parameter*)
- η = parameter skala (*scale parameter*)
- γ = parameter lokasi (*location parameter*)

Bila pendekatan data distribusi kegagalan suatu sistem menggunakan distribusi weibull, maka keandalan sistem dan *failure rate* sistem dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

- Fungsi *Reliability* $R(t)$:

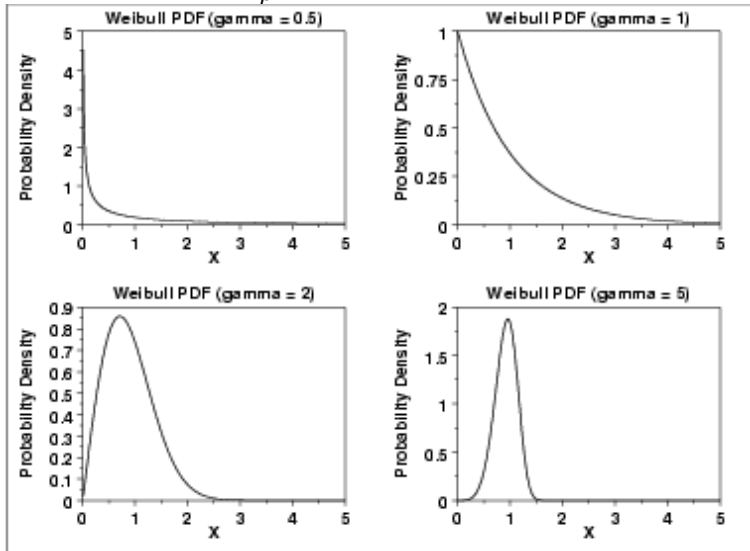
$$R(t) = \exp \left\{ - \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right\} \dots \dots \dots (2.12)$$

- Laju Kegagalan $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \dots \dots \dots (2.13)$$

- MTTF $E(t)$:

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots \dots \dots (2.14)$$



Gambar 2.5 Grafik Distribusi Weibull 2-parameter
(NISMATECH, 2012)

d. Distribusi Eksponensial

Probability density function dari distribusi *exponensial* dapat dicari dengan persamaan berikut (Leitch, 1995) :

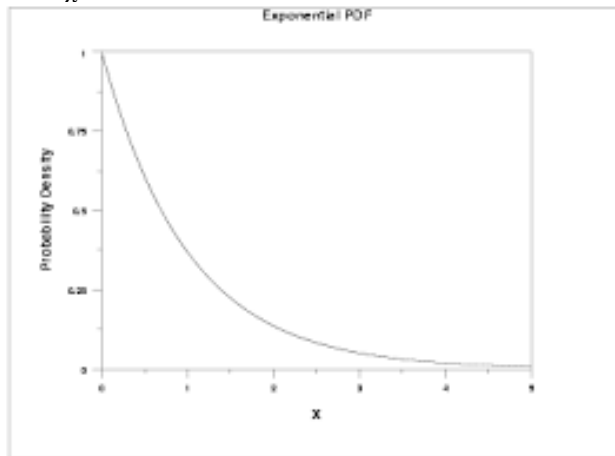
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (2.14)$$

Bila distribusi kegagalan suatu sistem menggunakan distribusi eksponensial, maka dapat digunakan persamaan berikut untuk mengetahui keandalan, *failure rate*, serta MTTF sistem :

- Fungsi *Reliability* $R(t)$:
 $R(t) = e^{-\lambda t}$ (2.15)

- Laju Kegagalan $\lambda(t)$ (Anshori & Mustajib, 2013) :
 $\lambda(t) = \lambda$ (2.16)

- MTTF $E(t)$ (Leitch, 1995) :
 $E(t) = \frac{1}{\lambda}$ (2.17)



Gambar 2.6 Grafik Distribusi Eksponensial (NISMATECH, 2012)

2.2.3 Sistem Seri

Suatu komponen atau sistem dapat dimodelkan dengan susunan seri jika komponen-komponen yang ada didalam sistem itu harus bekerja atau berfungsi seluruhnya agar sistem tersebut sukses dalam menjalankan fungsi dan misinya (Priyanta, 2000).



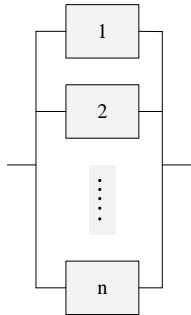
Gambar 2.7 Diagram Blok Susun Seri (Ebeling, 1997)

Jika ada n buah komponen dalam susunan seri dan masing memiliki keandalan R_1, R_2, \dots, R_n seperti pada gambar 2.7, maka rumus keandalannya adalah (Ebeling, 1997) :

$$R_s = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \dots \dots \dots (2.17)$$

2.2.4 Sistem Paralel

Suatu sistem dapat dimodelkan secara paralel jika komponen penyusunannya berupa *redundant system*. Sistem redundan merupakan sistem yang dapat bekerja salah satu komponennya dengan komponen lain dalam keadaan *stand by*.



Gambar 2.8 Diagram Blok Susun Paralel (Ebeling, 1997)

Sedang rumus keandalan dari n -buah komponen secara paralel yaitu (Ebeling, 1997) :

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \dots \dots \dots (2.18)$$

2.3 Hazard and Operability Study (HAZOP)

Hazard and Operability Study (HAZOP) adalah suatu teknik identifikasi dan analisis bahaya yang formal, sistematis, serta *logical*, dan terstruktur untuk meninjau suatu proses atau operasi pada sebuah sistem secara otomatis dan menguji potensi deviasi operasi dari kondisi desain yang dapat menimbulkan masalah operasi proses dan bahaya (Rausand, 2004).

Terdapat empat tujuan dasar dari analisis studi HAZOP antara lain (Nolan, 1994) :

1. Untuk mengidentifikasi penyebab-penyebab dari semua perubahan penyimpangan dalam fungsi proses.

2. Untuk menentukan semua bahaya-bahaya mayor dan permasalahan operasi.
3. Untuk memutuskan aksi apa yang dibutuhkan untuk mengontrol bahaya atau permasalahan *operability*.
4. Untuk meyakinkan bahwa aksi-aksi yang telah diputuskan terimplementasi dan terdokumentasi.

2.3.1 Guide Words dan Parameter HAZOP

Guide words adalah kata-kata sederhana atau frasa yang digunakan untuk menyatakan penyimpangan pada sistem atau kegiatan proses (secara kualitatif) (Nolan, 1994). Yang mana *guide words* tersebut merupakan hasil analisa terhadap data proses yang diambil serta dihitung secara kuantitatif menggunakan *statistic process control* (SPC).

Sedangkan proses parameter adalah parameter yang relevan untuk kondisi-kondisi dari proses (Nolan, 1994). Proses parameter biasanya berupa properti fisika atau proses kimia yang ada di dalam suatu sistem. Proses kimia yang dimaksud meliputi *composition*, *mixing*, *concentration*, dan *reaction*. Sementara properti fisika yang dimaksud seperti *temperature*, *pressure*, *level*, dan *flow*.

Tabel 2.1 *Guide Words* HAZOP (Nolan, 1994)

Guide-word	Meaning
No (not, none)	None of the design intent is achieved
More (more of, higher)	Quantitative increase in a parameter
Less (less of, lower)	Quantitative decrease in a parameter
As well as (more than)	An additional activity occurs
Part of	Only some of the design intention is achieved
Reverse	Logical opposite of the design intention occurs
Other than (other)	Complete substitution - another activity takes place

Tabel 2.2 Parameter Proses Analisa HAZOP (Nolan, 1994)

Flow	Composition	pH
Pressure	Addition	Sequence
Temperature	Separation	Signal
Mixing	Time	Start/stop
Stirring	Phase	Operate
Transfer	Speed	Maintain
Level	Particle size	Services
Viscosity	Measure	Communication
Reaction	Control	

Penggabungan antara *Guide Words* dan parameter proses akan menghasilkan data *deviation* atau penyimpangan, yakni suatu proses yang keluar atau melewati dari standar yang sebagaimana telah ditentukan suatu perusahaan maupun standar operasi sebuah komponen itu sendiri. Berikut ini adalah rumusan untuk menentukan deviasi proses (Rausand, 2004) :

$$\text{guide words} + \text{parameter} = \text{deviation} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dari hasil penyimpangan-penyimpangan proses yang terjadi pada sistem atau komponen tersebut barulah dapat dijabarkan apa saja yang menyebabkan deviasi tersebut, apa dan bagaimana konsekuensinya terhadap jalannya proses pada sistem atau palnt tersebut, serta aksi apakah yang tepat untuk menanggulangi permasalahan tersebut.

2.3.2 Control Chart

Control charts merupakan salah satu metode *statistical process control* yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik jalannya proses yang berlangsung dalam periode waktu tertentu. Sedangkan *Statistical process control* (SPC) adalah salah satu teknik yang dapat digunakan untuk melakukan evaluasi terhadap performansi suatu proses. Teknik ini menggunakan metode statistik untuk memonitor, menganalisa, mengontrol, dan mempengaruhi perbaikan performansi proses dengan menggunakan data hasil pengukuran (Indriawati, 2007)

Dengan menggunakan metode *control chart* dapat diketahui simpangan apa saja yang terjadi pada selama proses tersebut berlangsung. Suatu proses dapat dikatakan menyimpang apabila terdapat pembacaan real time proses yang menunjukkan adanya simpangan yang lebih besar dari standar deviasinya.

Berdasarkan data *real-time* proses pada *plant* dapat diketahui apakah proses tersebut cenderung berada di dalam *range* kendali atau justru diluar batas kendali (*out of control*). Batas kendali yang dimaksud adalah *Upper Control Limit* (UCL) dan *Lower Control Limit* (LCL) yang masing-masing mengindikasikan batas atas dan batas bawah dimana proses-proses tersebut dapat dikatakan terkendali. Sedangkan CL adalah parameter yang menunjukkan rata-rata pembacaan proses *real-time*. Pada penelitian kali ini digunakan Xbar chart dan s chart untuk mengidentifikasi jalannya proses. Dengan parameter-parameter yang terdapat pada formula dibawah ini (Montgomery, 2009) :

Xbar Chart

$$CL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S} \dots \dots \dots (2.21)$$

s Chart

$$CL_S = \bar{s} \dots \dots \dots (2.22)$$

$$UCL_{\bar{s}} = B_4 \bar{s} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$LCL_{\bar{s}} = B_3 \bar{s} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana :

$\bar{\bar{X}}$ = rata-rata data subgrup

A_3 = control limit factor (chart average)

B_3 & B_4 = factor for control limits (chart standart deviation)

\bar{s} = standart deviation of subgroup

\bar{S} = mean of standart deviation subgroup

2.3.3 Risk Matriks

Risk matriks adalah suatu metode penskalaan risiko dan bahaya yang mungkin terjadi pada sebuah komponen atau sistem pada suatu perusahaan untuk dinilai seberapa besar dampaknya bagi perusahaan tersebut. Dimana setiap potensi risiko tersebut memiliki *likelihood* dan konsekuensi (*consequences*) yang berdampak terhadap kematian (personal), kerusakan lingkungan, serta kerugian finansial, asset dan reputasi (Zhou, 2013). *Likelihood* didefinisikan sebagai ukuran probabilitas atau frekuensi yang dimungkinkan dari terjadinya suatu peristiwa (Johnson, 2010).

Tabel 2.3 Risk Matriks

L1	L2	L3	L4	L5
L2	L4	M6	M8	H10
L3	M6	M6	M12	H15
L4	M8	M12	H16	H20
L5	H10	H15	H20	H25

2.4 Safety Integrity Level

Safety integrity level adalah suatu ukuran yang menyatakan besarnya PFD dari suatu sistem. Sedangkan PFD atau *probability failure on demand* merupakan kemungkinan kegagalan komponen atau sistem ketika ia dibutuhkan untuk bekerja. Dengan mengetahui nilai SIL yang bekerja pada sebuah sistem maka akan diketahui pula seberapa tingkat keamanan atau *safety* dari sistem tersebut.

Dalam praktiknya ada dua buah metode penentuan SIL, yakni *SIL determination* dan *SIL verification*. *SIL Determination* adalah proses meninjau tingkat risiko yang terkait dengan peristiwa bahaya tertentu dan menilai kontribusi untuk pengurangan risiko yang diperlukan SIF agar kekurangan reduksi risiko dapat dicapai (King 2013).

SIL determination termasuk di dalamnya adalah *Layer of Protection Analysis*, yakni bertujuan untuk menentukan

rekomendasi tingkatan SIL yang sesuai untuk sebuah *sistem integrity function* agar dapat mengurangi kemungkinan bahaya atau risiko. Tabel 2.4 berikut ini adalah pengklasikasian kategori SIL:

Tabel 2.4 Kategori Nilai SIL (Cassiolato, 2012)

SIL Safety Integrity Level (IEC 61508)	Availability	PFD Probability of Failure on Demand (1-Availability)	Risk Reduction Factor (1/ PFD)
4 Catastrophic impact for community	> 99.99%	< 0.0001 (e^{-4})	> 10000
3 Protection of employees and community	99.9 – 99.99%	0.001 – 0.0001 ($e^{-3} \cdot e^{-4}$)	1000 - 10000
2 Protection of production and property, Possible damage to employees	99 – 99.9%	0.01 – 0.001 ($e^{-2} \cdot e^{-3}$)	100 – 1000
1 Slight impact to property and protection of production	90 – 99%	0.1 – 0.01 ($e^{-1} \cdot e^{-2}$)	10 – 100
0	Basic Process Control System (BPCS)		

SIL 4 merupakan tingkatan nilai SIL dengan kategori tingkat bahaya paling tinggi dan dampak yang paling besar, oleh karenanya harus diterapkan SIL 4 sehingga harus dilakukan reduksi risiko keterjadian kegagalan hingga 1 kejadian per 10000 jam. Berikut ini adalah rumusan untuk menentukan *Probability of Failure on Demand* (PFD) yang sesuai untuk sebuah SIF (Lassen, 2008) :

$$\frac{\text{SIF Integrity Level} = \text{necessary risk reduction} = \text{TMEL}}{\text{IEL}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana :

TMEL = *Target Mitigated Event Likelihood*

IEL = *Intermediete Event Likelihood*
 ICL = *Initiating Cause Likelihood*

$$IEL = ICL \times PFD_1 \times PFD_2 \times \dots \times PFD_n \dots \dots \dots (2.26)$$

Dari Nilai PFD yang telah didapatkan bisa digunakan untuk merepresentasikan nilai SIL yang sesuai untuk sebuah *safety instrumented function* (SIF).

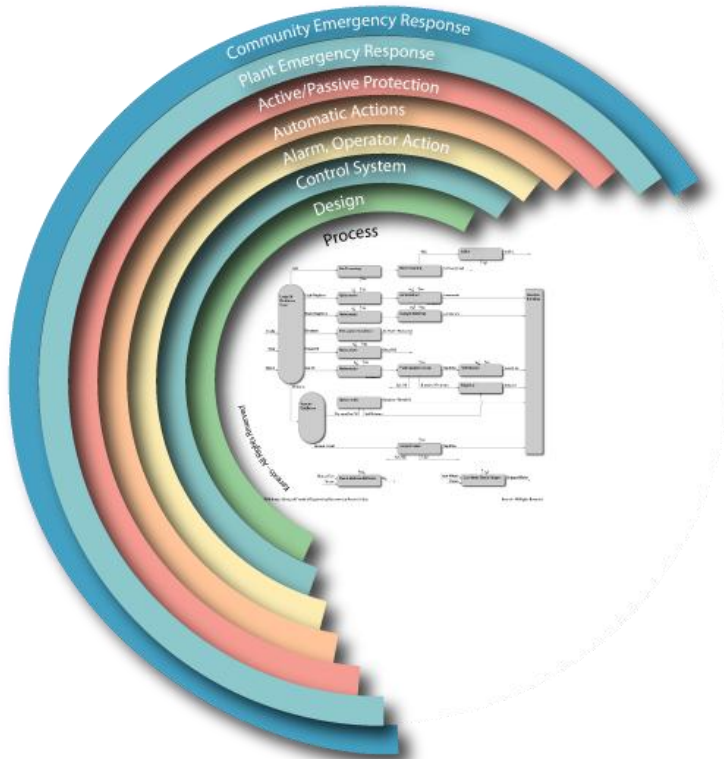
Penentuan TMEL disesuaikan dengan tingkat keparahan (*severity level*) dari bahaya yang mungkin terjadi. *Target Mitigated Event Likelihood* merupakan target suatu perusahaan yang ditujukan agar potensi/ probabilitas terjadinya suatu kegagalan atau bahaya pada plant dapat bernilai sekecil mungkin. Terdapat sebuah standar yang mewakili tingkat keparahan suatu bahaya berdasarkan konsekuensi yang ditimbulkannya yang juga telah diterjemahkan ke dalam angka-angka harapan TMEL, sebagaimana pada Tabel 2.5 berikut :

Tabel 2.5 *Target Mitigated Event Likelihood* (Lassen, 2008)

<i>Severity level</i>	<i>Safety consequence</i>	<i>Target mitigated event likelihood</i>
C_A	Single first aid injury	$3 \cdot 10^{-2}$ per year
C_B	Multiple first aid injuries	$3 \cdot 10^{-3}$ per year
C_C	Single disabling injury or multiple serious injuries	$3 \cdot 10^{-4}$ per year
C_D	Single on-site fatality	$3 \cdot 10^{-5}$ per year
C_E	More than one and up to three on-site fatalities	$1 \cdot 10^{-5}$ per year

2.5 Layer of Protection Analysis

LOPA adalah suatu metode yang digunakan untuk menilai tingkat keamanan suatu *plant* (*safety*) terhadap suatu ancaman risiko bahaya dengan menganalisa lapisan-lapisan pelindung yang telah diterapkan pada sistem atau komponen tersebut.



Gambar 2.9 *Layer of Protection* (Marszal, 2014)

Protection Layer (PL) adalah Perangkat, sistem atau tindakan yang mampu mencegah penyimpangan proses dari kemungkinan dampak akhir yang lebih parah (Lassen, 2008) Berikut adalah penjelasan untuk masing-masing PL :

1. *Process Design*

Process Design merupakan *layer protection* pertama pada sebuah sistem atau komponen pada dunia Industri. Proses desain juga turut mereduksi bahaya proses dengan mengurangi kemungkinan adanya penyimpangan proses. Contoh dari proses desain adalah seperti ketebalan pipa,

pemilihan bahan pada instrumen yang berhubungan dengan kondisi sistem.

2. *Basic Process Control System (BPCS)*

Tahap pengamanan kedua setelah adanya desain untuk proses adalah BPCS. BPCS diberi kemampuan untuk menjaga agar kondisi proses tetap berada di daerah aman, yaitu di daerah *process set point*. BPCS biasanya terdiri dari *sensor transmitter*, *logic solver (indicated control)*, dan *final element* atau *actuator*. BPCS bisa berupa loop pengendalian *full-automatic* namun juga bisa berupa *semi-automatic*.

3. *Alarms and Operator Actions*

Sistem alarm merupakan level perlindungan ketiga pada *layer* LOPA. Sistem alarm ada yang tergabung dengan BPCS dan ada pula yang independen terhadap BPCS. Ketika BPCS tak mampu mengatasi permasalahan ini (kondisi bahaya proses terus meningkat), maka sistem pengaman selanjutnya akan aktif.

Alarm akan menyala apabila terjadi suatu penyimpangan proses dari keadaan yang diinginkan. Ketika kondisi ini terlampaui, maka sistem alarm akan aktif. Kondisi ini biasa dinamakan *high or low condition*. Alarm akan membutuhkan tindakan operator sesuai SOP sebagai suatu bentuk tindak lanjut indikasi kegagalan.

4. *Automatic Actions (SIS)*

SIS adalah kombinasi sensor, *logic solver*, dan *final element* dengan tingkat integritas tingkat tinggi. Sistem ini bisa berupa ESD (*Emergency ShutDown Valve*), yakni valve yang bekerja untuk mematikan plant secara mendadak dengan cara memutus aliran fluida proses. SIS merupakan *layer* terakhir yang berfungsi dalam penanganan sebelum kejadian (*prevention*).

5. *Physical Protection (Relief Valve, Rupture Disc, etc)*

Perlindungan fisik merupakan *layer* yang bertindak apabila dampak (*fire*) sudah terlanjur terjadi. *Layer* ini berfungsi untuk melindungi komponen dan instrumen mayor pada sebuah industri.

6. *Passive Protection (Dikes, Blast Walls, etc)*

PL ini adalah alat pasif yang akan bekerja yang kegagalan dan kerusakan sudah terjadi, dan dibutuhkan tindakan penanggulangan untuk mencegah risiko kecelakaan meluas, seperti mencederai manusia, dan lingkungan sekitar. *Passive protections* biasa berupa *Dike* (galian) dan *Blast Wall* (tembok tahan api, biasanya dipasang di *offshore*).

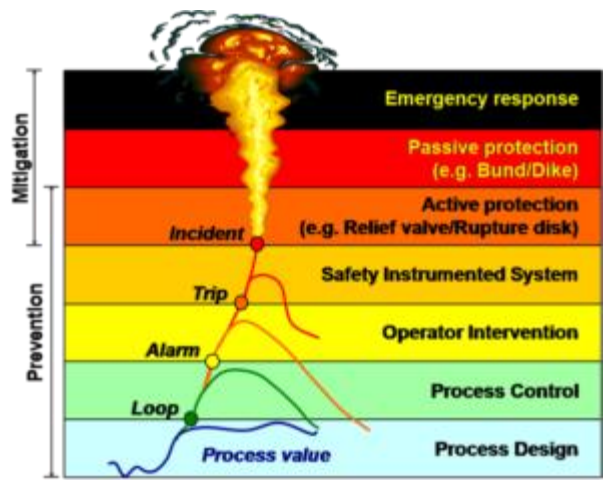
7. *Plant Emergency Response*

Fitur ini mencakup pasukan pemadam kebakaran, sistem pemadaman manual, fasilitas evakuasi, dll.

8. *Community Emergency Response*

Berbagai asset penting, properti bahkan SDM bisa saja menjadi terancam. Oleh karena itu tanggap darurat (*emergency Response*) adalah hal yang wajib dikembangkan di perusahaan untuk mengantisipasi kerugian akibat bencana yang karena suatu hal dapat tidak terkendali. Untuk mengatasi kejadian-kejadian seperti meledaknya sebuah plant dan bencana alam diperlukan adanya sistem manajemen ERP yang tepat. ERP (*Emergency Response Plan/ Tanggap Darurat Bencana*) adalah sistem yang menggabungkan beberapa departemen mencakup HRD, keamanan (*security*), kesehatan, termasuk K3 (keselamatan dan kesehatan kerja) itu sendiri untuk menanggulangi kejadian bencana tersebut.

Dibawah ini merupakan tingkatan bahaya yang dimungkinkan terjadi apabila setiap lapisan proteksi gagal menjalankan tugasnya. Terdapat pula pada gambar 2.10 tersebut kinerja reduksi bahaya yang dilakukan oleh tiap-tiap *layer* serta pembagian *Layer of Protection* ke dalam 2 kategori, yakni *prevention* (pencegahan) dan *mitigation* (peringanan insiden).

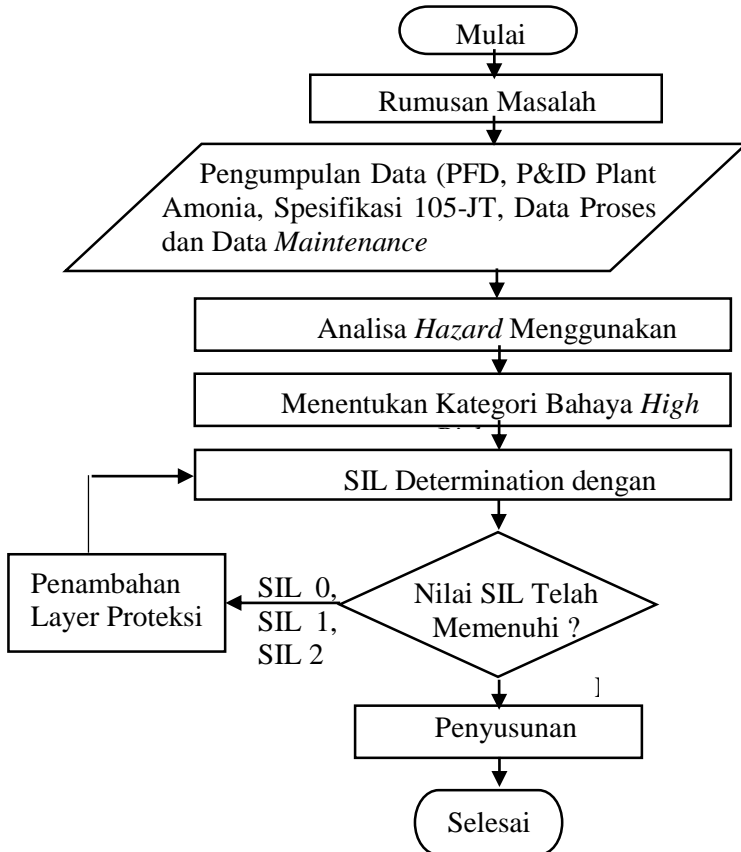


Gambar 2.10 Tingkat Bahaya Tiap *Layer*
(Hatch & Stauffer, 2009)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam Tugas akhir ini disusun langkah-langkah kerja sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 *Flowchart Penelitian*

3.2 Tahap-Tahap Penelitian

Adapun tahapan pada penelitian ini meliputi beberapa hal diantaranya :

a. Studi Literatur

Studi literatur merupakan tindak lanjut dari adanya rumusan masalah. yang dilakukan dengan mempelajari literatur, jurnal yang terkait dengan tema dan konsultasi dengan *supervisor* atau *engineer* yang berada di lapangan.

b. Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil data-data yang berupa:

1. Data spesifikasi komponen *steam turbine* 105-JT.
2. P&ID dan PFD plant Pabrik Amonia.
3. *Logsheets* data proses komponen instrumentasi dan komponen mekanikal penyusun node *steam turbine* 105-JT yang diambil untuk periode oktober, november, dan desember 2015.
4. *Data Maintenance* berupa perbaikan, penggantian, serta kalibrasi komponen yang diambil selama kurun waktu ± 10 tahun terakhir dari mesin *Steam Turbine* 105-JT yang tersedia pada Dept Pemeliharaan 1.
5. Serta wawancara dengan operator maupun pihak pelaksana SOP terkait bila dibutuhkan.

Pengambilan data dilakukan penulis selama lebih kurang tiga bulan pada bulan September–November 2016 di Pabrik Amonia PT. Petrokimia Gresik.

c. Analisis *Hazard*

Analisis bahaya atau *hazard* pada node *steam turbine* 105-JT dikerjakan dengan metode HAZOP (*Hazard Operability Study*). Analisa yang dilakukan meliputi penentuan deviasi, risiko, penyebab, serta peluang bahaya yang akan ditimbulkan pada *plant* serta pada *steam turbine 105-JT* khususnya. Tahapan dalam melakukan HAZOP diantaranya :

1. Menentukan *node*/ titik peninjauan berdasarkan data P&ID. Dalam tugas akhir ini *node* pada sistem adalah *Steam Turbine 105-JT*.
2. Menentukan instrumen kontrol dan monitoring serta komponen-komponen mekanikal lain yang bekerja serta menopang kestabilan kerja proses pada *steam turbine 105-JT*.
3. Menentukan *guide word* dan simpangan proses (deviasi) yang didapat dari data *logsheet* proses pembacaan *transmitter* selama bulan oktober, nopember, dan desember 2015. Dengan melakukan *plotting* menggunakan grafik *control chart* untuk mendapatkan deviasi dari pengendalian proses *Steam Turbine 105-JT*.

Dalam kasus penelitian ini digunakan *Xbar* dan *s chart* dengan estimasi *subgroup size* mencapai 25 untuk jumlah data yang diolah sebanyak 24 data dari 24 jam nilai rata-rata proses. Sehingga digunakan nilai parameter sebagai berikut (Montgomery, 2009) :

Control Limits Factor for averages

$$A_3 = 0,606$$

Factor for Limits of Standard Deviation,

$$B_3 = 0,565$$

$$B_4 = 1,435$$

4. Analisa terhadap penyebab terjadinya deviasi, dan dampaknya bagi kelangsungan proses pada node 105-JT khususnya dan pada *plant* keseluruhan secara umum.
5. Menentukan tingkat keparahan menggunakan skala *consequences* dan *likelihood*. Skala penilaian *consequences* dilakukan dengan menyimpulkan wawancara kepada pihak pelaksana SOP terkait dan dikategorikan melalui tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Klasifikasi Dampak Risiko

<i>Ranking</i>	
1	<i>Insignificant</i>
2	<i>Minor</i>
3	<i>Moderate</i>
4	<i>Major</i>
5	<i>Catastrophic</i>

Sedangkan untuk nilai *likelihood* didapatkan dengan membagi lama waktu operasi dengan MTTF dari masing-masing komponen. Penskalaan nilai *likelihood* dilakukan dengan menggunakan tabel 3.2.

Tabel 3.2 Klasifikasi *Likelihood*

<i>Ranking</i>	
1	<i>Brand New Excellent</i>
2	<i>Very Good / Good Serviceable</i>
3	<i>Accepetable</i>
4	<i>Below Standart / Poor</i>
5	<i>Bad / Unacceptable</i>

6. Menentukan *risk ranking* untuk setiap dampak bahaya yang ditimbulkan akibat masing-masing deviasi atau kegagalan kerja pada komponen dengan mengacu pada Tabel 2.3. Lalu dianalisa manakah dari nilai tersebut yang dikategorikan dalam zona merah atau *high risk*. Berikut ini adalah rumusan yang digunakan untuk menentukan *risk ranking* suatu *event* kegagalan (Johnson, 2010) :

$$\text{Risk Ranking} = \text{Consequences} \times \text{Likelihood}.....(3.2)$$

- d. Perhitungan SIL dengan metode *Layer of Protection Analysis* (LOPA)

Perhitungan SIL dengan metode LOPA dapat dilakukan melalui perhitungan dari PFD tiap komponen yang mewakili setiap *event*. Nilai SIL sistem *Steam Turbine* 105-JT diperoleh dari keseluruhan PFD dari komponen SIF yang menyusun node *Steam Turbine* 105-JT sehingga didapatkan tingkatan SIL yang sesuai untuk mereduksi risiko.

e. Penyusunan Laporan

Penulisan laporan penelitian disertai hasil dan analisis serta kesimpulan yang memuat rekomendasi bagi perusahaan guna meningkatkan tingkat *safety* terhadap ancaman bahaya yang mungkin terjadi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Alur Proses pada *Steam Turbine 105-JT*

Steam turbine 105-JT adalah sebuah unit turbin ekspansi yang berfungsi untuk menghasilkan kerja pada kompresor dengan berputarnya poros turbin. Fluida yang digunakan untuk memutar poros turbin ialah uap berjenis medium pressure yang diambil dari *Medium Steam header*, yang mana jumlah steam yang digunakan akan dikendalikan oleh sebuah perangkat pengendali *governing system*. Pada proses ekspansi yang terjadi di dalam turbin, senantiasa kuantitas dan kualitas steam akan selalu dijaga. Kuantitas steam yang masuk ke dalam turbin akan sangat mempengaruhi kecepatan putar poros turbin tersebut. Dampaknya adalah jika putaran poros turbin tidak memenuhi kebutuhan pada kompresor, maka akan terjadi kekurangan *pressure* pada *refrigerant flush drum 120 CF1*.

Oleh karena itu dipasang sebuah *pressure transmitter* pada komponen *refrigerant flush drum 120 CF1*. Selain itu, kualitas steam akan dijaga melalui *admission assembly valve*. Dimana valve ini akan berfungsi apabila terdapat indikasi *pressure* berlebih pada line *M.S. header*. *Admission valve* adalah sebuah valve yang terhubung dengan pipa *Low Steam header*, yang mana pipa tersebut merupakan sebuah pipa yang memuat uap bertekanan rendah yang berfungsi sebagai steam tambahan untuk turbin 105-JT. Yang mana steam yang digunakan pada kasus ini akan dikategorikan sebagai *mixing steam*. *Admission valve* ini merupakan instrumen kontrol kedua yang digunakan untuk mengontrol jalannya proses kerja dari turbin 105-JT. Letaknya berada setelah *governor valve assembly*.

Keluaran utama *steam turbine 105-JT* adalah kerja yang dihasilkan untuk memutar poros kompresor. Sementara uap air yang telah diturunkan tekanannya akan dialirkan kembali menuju komponen 101 JTC.

4.2 Keandalan Sistem

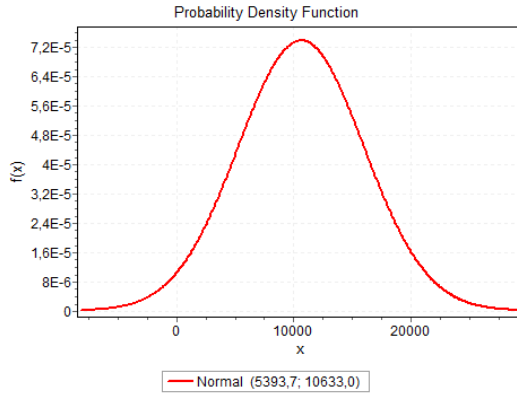
Pada PT. Petrokimia Gresik ditentukan bahwasanya setiap *main component* atau sistem akan dilakukan sebuah *maintenance* atau perbaikan secara menyeluruh manakala sistem tersebut bekerja dalam melakukan setiap prosesnya dengan persentase keandalan sebesar 60 %. Kegiatan *maintenance* skala besar atau *Overhaul* yang ada pada perusahaan akan dijadwalkan secara bergantian antara satu *main component system* dengan *main component system* yang lain. *Scheduling overhaul* sangat penting bagi perusahaan mengingat kegiatan produksi tidak dimungkinkan untuk berhenti bekerja dalam waktu yang lama mengingat kebutuhan produksi yang harus dipenuhi. Untuk itu perusahaan tidak hanya memberlakukan *maintenance* yang bersifat *corrective* namun juga perbaikan yang sifatnya *preventive* yang dilakukan lebih kurang 1-2 bulan sekali per *main component*. Keandalan sistem *steam turbine* 105-JT sendiri apabila mengacu pada *reliability* yang dimiliki komponen instrumentasi kontrolnya adalah sebagai berikut.

$$R_{system} = R_{loop1009} \times R_{loop1020} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana loop 1009 dan 1020 adalah dua loop pengendalian utama proses *steam turbine* 105 JT. *Reliability* suatu loop dihitung dengan cara menggabungkan data-data *maintenance* komponen *transmitter* dan *final element* atau *actuator* pada loop tersebut. Data yang tersedia akan ditentukan distribusi dari *Mean Time To Failure* (MTTF) dan *Reliability loop*.

4.2.1 Keandalan Loop 1009

Dari data *maintenance loop* 1009 yang diperoleh dari Dept. Pemeliharaan 1 PT. Petrokimia Gresik, didapatkan distribusi MTTF berupa sebaran Normal dengan parameter $\sigma = 5393.7$ dan $\mu = 10633$. Sehingga MTTF loop 1009 adalah sebagai berikut (Ebeling, 1997) :



Gambar 4.1 Grafik Distribusi *Loop* 1009

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \mu = 10633 \\
 R_{loop\ 1009} &= \Phi\left(\frac{t - \sigma}{\mu}\right) \\
 &= \Phi\left(\frac{10633 - 5393.7}{10633}\right) \\
 &= \Phi(0.5) \\
 &= 0.30854
 \end{aligned}$$

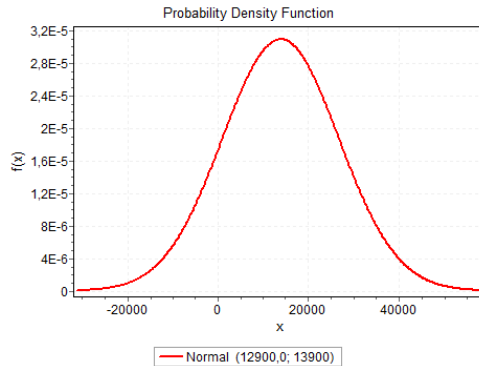
Dimana fungsi $\Phi(z)$ adalah fungsi *standardized normal probability* yang didapat dari tabel pada lampiran A.

4.2.2 Keandalan *Loop* 1020

Dengan mengolah data data *maintenance* yang diperoleh dari Dept. Pemeliharaan 1, maka didapatkan distribusi MTTF *loop* 1016 berupa sebaran Normal dengan nilai parameter $\sigma = 12900$ dan $\mu = 13900$ seperti terlihat pada gambar 4.2. Dengan menggunakan tabel fungsi *standardized normal probability* ditentukan nilai *reliability loop* 1020 adalah[2] :

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \mu = 13900 \\
 R_{loop\ 1020} &= \Phi\left(\frac{t - \sigma}{\mu}\right)
 \end{aligned}$$

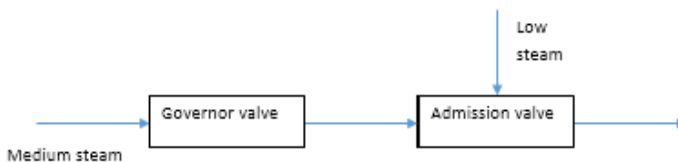
$$\begin{aligned}
 &= \Phi\left(\frac{13900 - 12900}{13900}\right) \\
 &= \Phi(0.072) \\
 &= 0.471304
 \end{aligned}$$



Gambar 4.2 Grafik Distribusi *Loop 1020*

4.2.3 Reliability Total

Sistem instrumentasi pada *steam turbine* 105-JT merupakan sebuah sistem yang dirangkai secara seri antara satu instrumen dengan instrumen penyusun lainnya seperti pada gambar 4.3. Dimana sistem tidak akan berjalan atau bekerja apabila salah satu dari kedua instrumen pensuplai steam tersebut gagal menjalankan fungsinya.



Gambar 4.3 Rangkaian Instrumentasi Seri pada 105-JT

Dengan menggunakan persamaan (2.17) maka dapat ditentukan *reliability* sistem turbin uap 105-JT:

$$R_{system} = 0.30854 \times 0.471304$$

$$R_{system} = 0.145416$$

$$e^{-\lambda_s t} = 0.145416$$

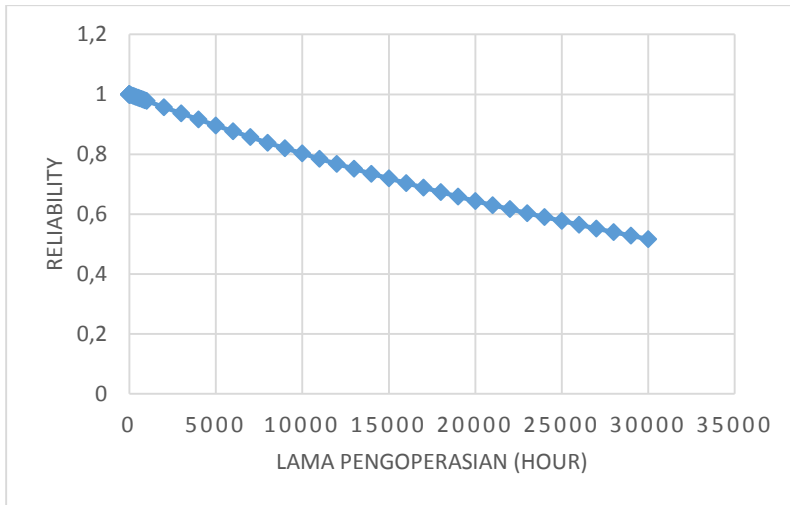
Dengan $t = 87600$ jam (10 tahun), maka

$$\lambda = 2.201 \times 10^{-5} \text{ /hour}$$

Tabel 4.1 Perhitungan *Reliability* Sistem 105-JT

Hour	R
1	0,999978
2	0,999956
3	0,999934
4	0,999912
5	0,99989
6	0,999868
7	0,999846
8	0,999824
9	0,999802
10	0,99978
11	0,999758
12	0,999736
100	0,997801
200	0,995608
300	0,993419
400	0,991235
500	0,989055
600	0,986881
700	0,984711
800	0,982546

<i>Hour</i>	R
900	0,980386
1000	0,97823
2000	0,956935
3000	0,936103
4000	0,915724
5000	0,895789
6000	0,876288
7000	0,857212
8000	0,838551
9000	0,820296
10000	0,802439
11000	0,78497
12000	0,767881
13000	0,751165
14000	0,734812
15000	0,718816
16000	0,703168
17000	0,68786
18000	0,672886
19000	0,658237
20000	0,643908
21000	0,62989
22000	0,616178
23000	0,602764
24000	0,589642



Gambar 4.4 Grafik *Reliability* Terhadap Waktu

Dari gambar grafik 4.4 dan Tabel 4.1 diatas menunjukkan bahwa target *overhaul* perusahaan pada keadaan *reliability* sistem sama dengan 60% terjadi pada jam pengoperasian ke 23000 (2,6 tahun). Dalam rentang waktu tersebut perusahaan dituntut untuk melakukan perbaikan yang bersifat *preventive maintenance* guna mencegah terjadinya kegagalan yang berakibat fatal, mengingat status 105-JT yang merupakan *non-redundant system*. Perencanaan *maintenance* pun harus tepat guna dan memperhitungkan aspek ekonomis yang akan dikeluarkan perusahaan dalam melakukan setiap perbaikannya sehingga perlu adanya analisa risiko dan bahaya terhadap setiap aktifitas proses yang terjadi. Di lain pihak harus juga dilakukan telaah lebih dalam apakah sistem *safety* yang digunakan sudah mampu mereduksi risiko tersebut. Pada sub bab selanjutnya akan dilakukan analisa yang lebih mendalam untuk kedua hal tersebut.

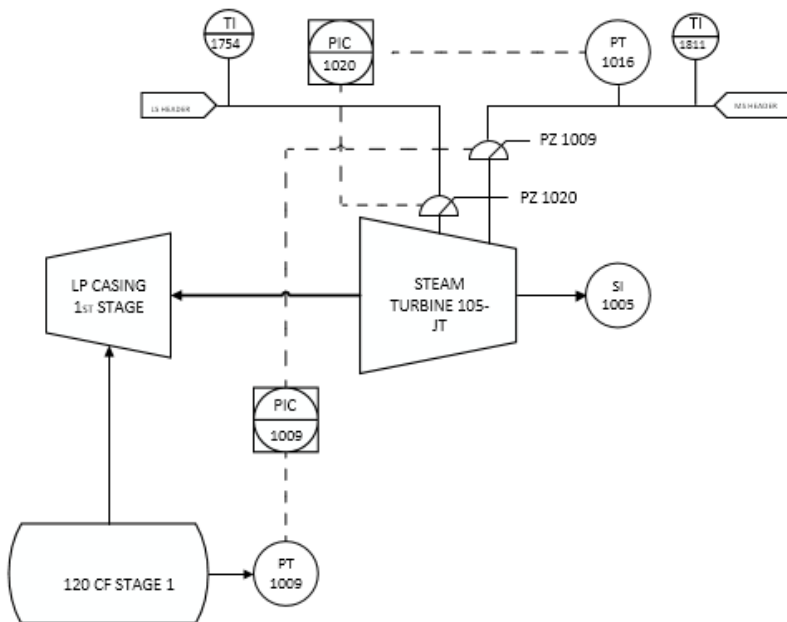
4.3 Analisis Risiko

Dalam melakukan analisis potensi bahaya pada *steam turbine* 105-JT adalah dengan menggunakan data proses atau *logsheet* dari setiap *transmitter* yang terdapat pada 105-JT, baik yang berupa

satu loop pengendalian maupun yang hanya berfungsi sebagai *monitoring*. Data *logsheet* tersebut didapat dari *Process Historical Database* pada DCS dengan pola data rata-rata tiap jam operasi dari pembacaan selama 3 bulan terakhir pada 2015, yakni oktober, november, dan desember 2015. Potensi bahaya yang ditimbulkan dapat diketahui berdasarkan pola penyimpangan rata-rata data operasi yang ditentukan dengan *guide word* dan dinyatakan dengan deviasi.

Proses pada *steam turbine* 105-JT dijaga dan dikendalikan dengan 2 buah loop pengendalian berupa BPCS (*Basic Process Control System*), yakni PT 1009 pada *governing system* dan PT 1016 sebagai input untuk *admission valve assembly*. Dua buah instrumen sensor lain yang juga terdapat pada 105-JT adalah sebuah loop *semi-automatic* dimana indikator digunakan untuk memonitor temperatur pada *node* 105-JT.

Sebagai langkah antisipasi terjadinya ancaman bahaya akibat kegagalan proses pada 105-JT maka diberikan sebuah *safety control* berupa *trip throttle valve*. TTV akan bekerja dengan beberapa parameter *input* diantaranya adalah SI 1005, dimana sinyal kontrol yang dikirimkan oleh SI 1005 ke DCS akan berfungsi untuk mengaktifkan TTV apabila terdapat indikasi *overspeed* pada 105-JT. Selain itu ada beberapa elemen *monitoring* yang ditambahkan pada *node* 105-JT untuk dapat meningkatkan keamanan jalannya proses, yakni TI 1811 dan TA 1754, masing-masing pada line *MS header* dan *LS header*. Elemen-elemen *sensing* dan *monitoring* tersebut bersifat *semi-automatic* karena tidak berupa loop yang memiliki sebuah *final element* atau *actuator* berupa *valve*.

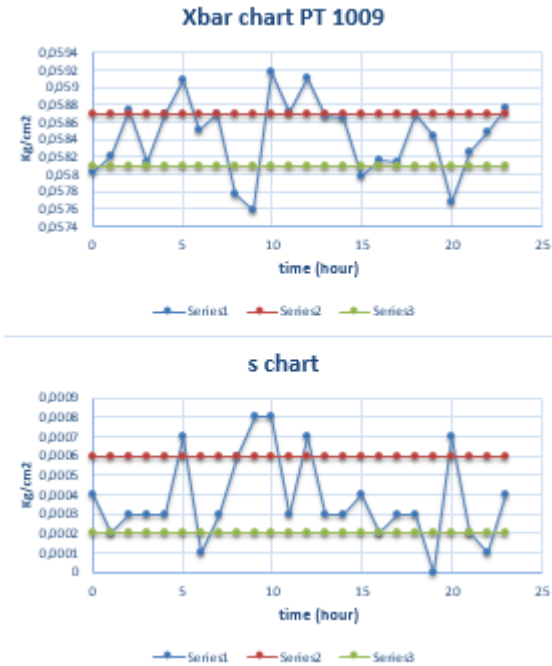


Gambar 4.5 P&ID *Steam Turbine 105-JT*

Berdasarkan data *log sheet steam turbine 105-JT* dapat diperoleh grafik *control chart* terhadap rata-rata operasi setiap komponen. Dari grafik tersebut akan didapatkan apakah terdapat penyimpangan proses yang terjadi. Dikatakan bahwa suatu proses tersebut mengalami penyimpangan bilamana didapati pada grafik *Xbar Chart* titik-titik pembacaan yang melewati batas atas (UCL) atau batas bawah (LCL). Dimana diketahui bahwa simpangan pada UCL maupun LCL senilai dengan 3 kali standar deviasi (3σ) (Montgomery, 2009).

4.3.1 *Pressure Transmitter 1009 (PT 1009)*

Pressure transmitter 1009 (PT1009) merupakan komponen sensor dan *transmitter* untuk loop pengendalian *pressure* pada 120 CF stage 1 flush drum. Diperoleh deviasi dari grafik *control chart* pada pembacaan tekanan rata-rata /jam sebagaimana pada gambar 4.6. Dimana $UCL=0,0587$ dan $LCL=0,0581$ Kg/cm².



Gambar 4.6 Grafik *Logsheets* PT 1009

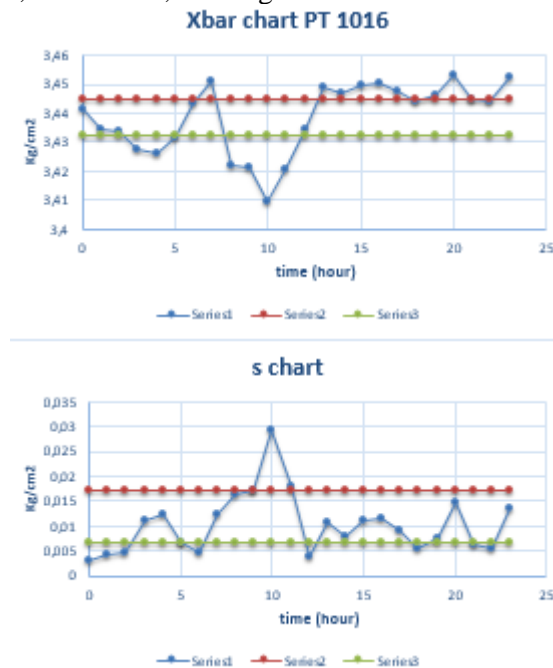
Dengan $CL=0,0584 \text{ Kg/cm}^2$. Dari grafik gambar 4.6 di atas dapat diketahui bahwa sistem yang dikendalikan beroperasi cukup stabil tiap jamnya, dimana tidak terdapat nilai simpangan rata-rata yang terlalu jauh dari batas atas dan bawah dari kendali operasi. Fluktuasi terbesar yang rata-rata terjadi adalah meningkatnya nilai pembacaan *pressure* pada selang waktu menjelang siang hingga tepat siang hari pada pukul 10.00-13.00. Namun ada kalanya pada waktu operasi petang hingga malam hari pukul 19.00-21.00 terdapat fluktuasi penurunan *pressure* dibawah rata-rata operasi. Tren grafik pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa proses juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan luar yang mungkin bisa berupa temperatur sekitar *plant*. Maka dari itu ditentukan *guideword* dan deviasi dari PT 1009 adalah sebagaimana pada tabel 4.2 berdasarkan probabilitas 12,5% operasi melewati batas UCL dan 16,7% operasi di bawah batas LCL.

Tabel 4.2 *Guide Word dan Deviasi PT 1009*

Component	Description	Guideword	Deviation	%
PT1009	Pressure Transmitter	High	High Pressure	12,5
		Low	Low Pressure	16,7

4.3.2 Pressure Transmitter 1016 (PT 1016)

Pressure Transmitter 1016 (PT 1016) pada *loop* pengendalian tekanan yang berada pada line medium steam header berfungsi untuk menjaga *pressure* keluaran uap dari governor dengan cara menambahkan steam pada bagian admission yang diambil dari *line Low Steam header*. Dari data proses didapatkan grafik *control chart* deviasi pada gambar 4.7. Dimana $CL=3,4386 \text{ Kg/cm}^2$, UCL dan $LCL = 3,4448$ dan $3,4324 \text{ Kg/cm}^2$.

**Gambar 4.7** Grafik *logsheet* PT 1016

Sebaran nilai pada grafik 4.7 menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan rata-rata pembacaan *pressure* pada *line Medium Steam header* mengalami penurunan cukup signifikan pada pukul 08.00-11.00 hingga melewati batas bawah rata-rata pembacaan *transmitter*. Pada lain kondisi terlihat bahwa proses diindikasikan mengalami kenaikan tekanan pada pukul 13.00 dan kondisi ini bertahan cukup tunak pada keadaan tersebut sampai dengan pukul 23.00, kendati nilai rata-rata tersebut tidak didapati penyimpangan yang begitu jauh dari batas atas pembacaan *transmitter*.

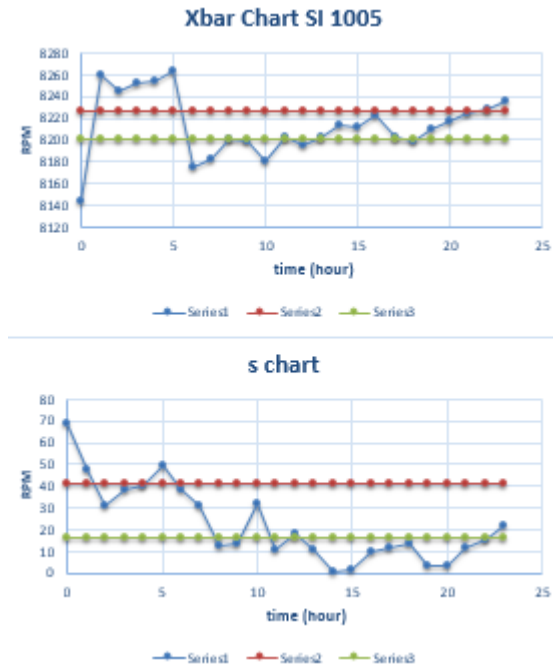
Sehingga dapat diambil analisis *guideword* dan deviasi pada instrumen PT 1016 adalah seperti pada tabel 4.3 berikut berdasarkan nilai probability lewat batas kendali sebesar 33,3% untuk UCL dan 29,17% untuk LCL:

Tabel 4.3 *Guide Word dan Deviasi PT-1016*

<i>Component</i>	<i>Description</i>	<i>Guideword</i>	<i>Deviation</i>	<i>%</i>
PT1016	<i>Pressure Transmitter</i>	<i>High</i>	<i>High Pressure</i>	33,3
		<i>Low</i>	<i>Low Pressure</i>	29,17

4.3.3 *Speed Indicator 1005 (SI 1005)*

Kondisi dari *steam turbine* sangat dijaga dari kemungkinan-kemungkinan yang dapat menimbulkan gagalnya proses diakibatkan faktor internal pada turbin uap. Salah satu hal paling signifikan yang dapat menyebabkan sistem mengalami trip paksa adalah keadaan dimana 105-JT diindikasikan *overspeed*. Berikut merupakan grafik tren operasi SI 1005 dengan menggunakan *Statistic Process Control*, dimana CL= 8213,44 rpm sedangkan UCL= 8226,96 rpm dan LCL= 8199,92 rpm:



Gambar 4.8 Grafik *logsheet* SI 1005

Tren grafik rata-rata operasi SI 1005 memperlihatkan kecenderungan meningkat pada jam-jam operasi pukul 01.00-05.00. Dan akan terlihat lebih stabil manakala telah melewati periode tersebut. Sehingga dari grafik *control chart* SI 1005 dapat dilakukan penentuan *guide word* dan deviasi sebagaimana pada table 4.4 berikut didasari pada *probability* keterjadian simpangan yang melewati batas kendali, yakni 25% untuk UCL dan 12,5% untuk LCL.

Tabel 4.4 *Guide Word dan Deviasi SI 1005*

<i>Component</i>	<i>Description</i>	<i>Guideword</i>	<i>Deviation</i>	<i>%</i>
SI 1005	<i>Speed Indicator</i>	<i>High</i>	<i>High speed</i>	25
		<i>Low</i>	<i>Low speed</i>	12,5

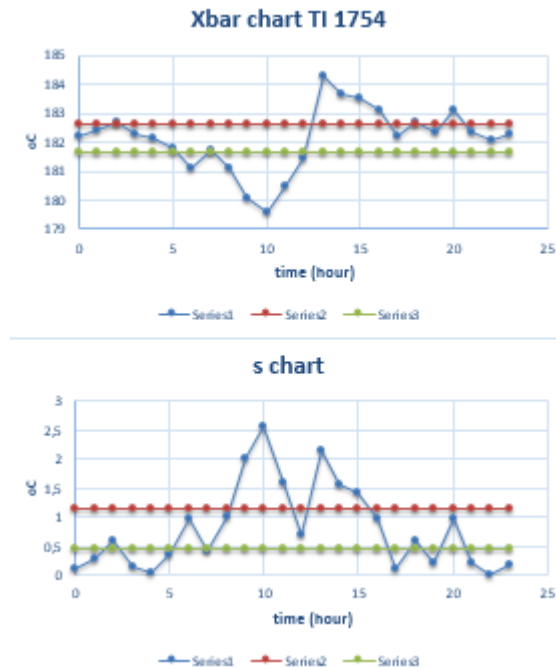
Dari *guideword* yang tersedia bahwa potensi bahaya yang dapat terjadi pada steam turbine 105-JT yang diindikasikan oleh elemen *sensing* SI 1005 adalah terjadinya *overspeed* dan *lowspeed*. Yang mana kedua indikasi tersebut berpotensi menimbulkan bahaya lainnya dengan dampak yang lebih besar.

4.3.4 *Temperature Indicator 1754 (TI 1754)*

Pada 105-JT terdapat pula elemen *monitoring* yang berupa sensor temperatur yang digunakan untuk mengukur suhu *steam* masukan pada *line Low Steam Header* menuju *admission valve* (PZ 1020). Sejatinya bahwa temperature yang diukur merupakan hasil keluaran dari *superheat burner* yang fungsinya adalah untuk memanaskan air hingga menjadi steam. Elemen TI 1754 tersebut bisa disebut sebagai komponen penyusun loop pengendalian *semi-automatic*. Dikatakan semi-automatic karena *Temperature indicator* akan mengirimkan sinyal yang akan terdisplay pada *control room* sehingga senantiasa temperatur aktual dapat dipantau. Dengan seperti ini maka fungsi aktuator atau *final element* akan diambil peran oleh operator sendiri sebagai pengambil keputusan apabila ada indikasi meragukan ataupun kegagalan pada sistem.

Sehingga tren grafik pengendalian rata-rata jamnya pada setiap hari ditampilkan pada gambar 4.9 di bawah ini. Dimana:

CL	= 182,114 °C
UCL	= 182,6003°C
LCL	= 181,6278°C



Gambar 4.9 Grafik *logsheet* TI 1754

Disimak dari gambar grafik 4.9 diatas bahwa tren operasi TI 1754 menunjukkan adanya fluktuasi yang signifikan pada jam operasi antara pukul 0600-16.00. Terlihat bahwasanya terdapat indikasi temperatur dari uap bertekanan rendah mengalami kenaikan temperatur mulai pukul 11.00 hingga terlihat menurun pada pukul 16.00, bahkan diantara kurun selang waktu tersebut temperatur steam sempat berada di titik yang melebihi batas atas rata-rata operasi.

Data Xbar jam dimana rata-rata pengukuran ada yang diluar batas kendali. Terlepas zona kendalia simpangan Xbar yang terjadi tidak terpaut jauh dari CL dan hanya terpaut selisih desimal. Serta tren dari data standar deviasi yang masih di dalam zona kendali. Jika dianalisis maka masih terjadi penyimpangan pada Xbar baik lebih tinggi dan lebih rendah dari zona kendali, sehingga dapat ditentukan *guideword* serta deviasi pada komponen tersebut di

tabel 4.5 di bawah ini berdasarkan probabilitas keterjadian penyimpangan yang melebihi batas kendali, yakni sebesar 25% untuk UCL dan LCL.

Tabel 4.5 *Guide Word dan Deviasi TI 1754*

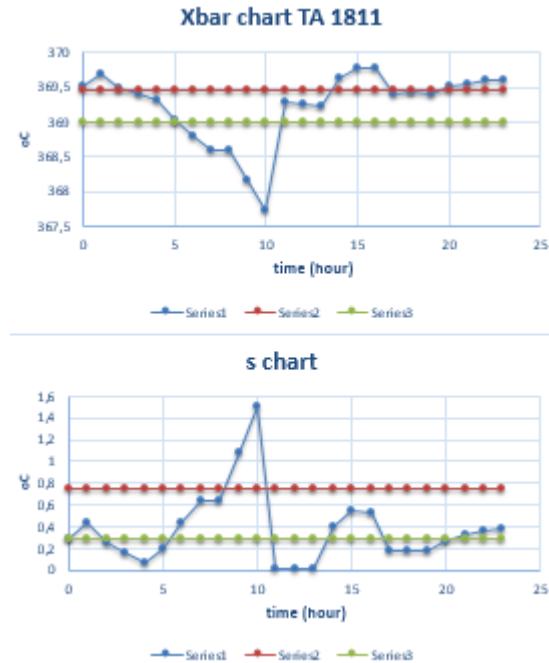
<i>Component</i>	<i>Description</i>	<i>Guideword</i>	<i>Deviation</i>	<i>%</i>
TI 1754	<i>Temperature Transmitter</i>	<i>High</i>	<i>High Temperature</i>	25
		<i>Low</i>	<i>Low Temperature</i>	25

4.3.5 *Temperature Indicator (TI 1811)*

Komponen lain yang juga menunjang stabilnya sistem proses yang ada pada node 105-JT adalah elemen *monitoring* temperatur TI 1811. Sensor temperatur ini terletak pada *line Medium Steam header* menuju *governor valve* (PZ 1009). Temperatur steam pada bukaan katup governor cukup penting untuk terus dipantau kondisinya sebab jika temperatur *steam* terlalu tinggi maka akan berdampak pada 105-JT, baik kondisi komponen maupun jalannya proses. Hal ini juga dapat menjadikan evaluasi terhadap kinerja *superheat burner* yang notabene sebagai penyedia fluida berupa steam.

Dari keseluruhan data proses pada TI 1811 yang telah diolah didapatkan parameter-parameter *Statistic Process Control* sebagai berikut :

CL = 369,24 °C
 UCL = 369,47 °C
 LCL = 369,01.°C



Gambar 4.10 Grafik *logsheet* TA 1811

Terlihat dari gambar 4.10 diatas bahwa pembacaan temperatur rata-rata pada line medium steam header yang menuju katup governor relatif stabil dengan simpangan yang kecil. Didapat bahwasanya batas atas pembacaan indicator menunjukkan angka $UCL = 369,47^{\circ}\text{C}$, dan batas bawah LCL sebesar $369,01^{\circ}\text{C}$. Namun pada kurun operasi pukul 05.00-10.00 didapat bahwa pembacaan TI 1811 memperlihatkan penurunan temperatur yang cukup drastis hampir 2°C . Dari data proses tersebut dapat diambil *guide word* dan deviasi sebagaimana tabel 4.6 berikut berdasarkan penyimpangan yang ada dengan probabilitas 8,33% melebihi UCL dan 20,83% di bawah LCL .

Tabel 4.6 *Guide Word dan Deviasi TI 1811*

<i>Component</i>	<i>Description</i>	<i>Guide word</i>	<i>Deviation</i>	<i>%</i>
TI 1811	<i>Temperature Indicator</i>	<i>High</i>	<i>High Temperature</i>	8,33
		<i>Low</i>	<i>Low Temperature</i>	20,83

4.4 Analisis Potensi, Penyebab dan Akibat Bahaya

Analisis risiko adalah kegiatan analisis kemungkinan dampak bahaya yang terjadi akibat adanya penyimpangan dari kondisi proses yang diinginkan dan dikendalikan. Dalam metode HAZOP terdapat beberapa analisa diantaranya *guide word*, *deviation*, *causes* dan *consequences*.

Data *guide word* dan deviasi telah didapatkan dari langkah sebelumnya dengan menggunakan *control chart*. Sedangkan analisis *causes* adalah kegiatan menganalisa kemungkinan-kemungkinan apa sajakah yang memicu timbulnya deviasi atau penyimpangan proses. Dari analisa *causes* maka akan didapatkan kemungkinan bahaya apa dan manakah yang akan mengancam jalannya proses pada mesin steam turbine 105-JT. Dimana setiap *causes* mungkin memiliki beberapa dampak yang memungkinkan timbul darinya lebih dari satu bahaya. Bahaya-bahaya yang merupakan dampak penyimpangan proses inilah yang disebut dengan *consequences*. Keduanya, *causes* dan *consequences* didapatkan dengan proses menganalisa proses pada *steam turbine* 105-JT ditambah dengan wawancara kepada petugas operator atau pihak-pihak pelaksana SOP terkait.

Tabel 4.7 *Causes and Consequences*

Component	Guide Word	Deviation	Causes	Consequences
PT 1009	High	High Pressure	pressure on 120 flash drum is too high, increased pressure	effected on flash drum 120 CF1, increasing pressure caused increasing temperature, ammonia vapor disturbed
	Low	Low Pressure	pressure on 120 flash drum is too low, decreased pressure	effected on flash drum 120 CF1, decreasing pressure caused decreasing temperature, ammonia vapor disturbed
PT 1016	High	High Pressure	pressure from MS header is too high	turbin work harder, maybe caused internal damage, overpressure
	Low	Low Pressure	pressure drop during in the pipes	turbin work not maximal, decreasing on efficiency

Component	Guide Word	Deviation	Cause	Consequences
PZ 1009 (Governor Valve)	None	No steam flow	system control fail, no signal control, broken oil instrument	lack of steam in to 105-JT, compressor not working, steam turbine 105-JT trip
	High	high speed	a. system control fail, no signal control, broken air instrument b. High Flow steam	105-JT overspeed, plant trip and shutdown cause equipment damage High Speed Turbine - High Vibration - Internal Damage
	Low	Low Speed	a. system control fail, no signal control, broken air instrument b. Low Flow Steam	Low Speed, Low power Turbine, Low Power Compressor - Low Pressure on Discharge compressor

Component	Guide Word	Deviation	Causes	Consequences
Trip Throttle Valve	Reverse	Steam Flow Continuously	system control fail, no signal control, failed to close	Turbine operate in danger condition, high vibration, internal damage
PZ 1020 (Admission valve)	Reverse	Steam Flow Continuously	system control fail, no signal control, failed to close	increased speed, cause until overspeed on 105-JT, effected cause on mechanical damage
Gasket	High	High leakage of steam	the component is aus, turbine working in high pressure	loss efficiency on steam Turbine 105-JT
Nozzle	High	High frequency of Vibration	the component is aus, turbine working in high pressure	high vibration occurred on 105-JT, and caused the other mechanical damage

Component	Guide Word	Deviation	Causes	Consequences
Labyrinth	High	High Leakage of steam	the component is aus, turbine working in high pressure	loss efficiency on steam Turbine 105-JT
Bearing	High	High frequency of Vibration and High Temperature	the component is aus, turbine working in high pressure	high vibration and high temperature occurred on 105-JT, and caused the other mechanical damage
SI 1005	High	High speed on Rotating Turbine shaft	More flow from Steam Header, Mechanical damage	Other Mechanical damage, 105-JT trip
	Low	Low speed on Rotating Turbine shaft	Lack of steam flow from Steam Header	Decrease quality of steam, Low power Compressor

Component	Guide Word	Deviation	Causes	Consequences
TI 1754	High	High Temperature	Increasing Heat from Superheat Burner	Mechanical damage
	Low	Low Temperature	Decreasing Heat from Superheat Burner	Decrease quality of steam
TA 1811	High	High Temperature	Increasing Heat from Superheat Burner	Mechanical damage
	Low	Low Temperature	Decreasing Heat from Superheat Burner	Decrease quality of steam

4.4.1 Penentuan *Likelihood*

Penilaian keterjadian kerusakan/ *likelihood* dapat ditentukan menggunakan data *maintanace*, penggantian instrumentasi dan komponen mekanikal yang diperoleh dari Dept. Pemeliharaan I Pabrik Amonia. Sedangkan untuk komponen yang dalam proses perbaikannya tidak terdapat rekapitulasi, maka akan diambilkan data tersebut pada OREDA (*Offshore Reliability Data*) 2002 tentunya dengan memperhatikan spesifikasi dari komponen terkait. Nilai *likelihood* dihitung dengan membagi waktu operasi instrumen terhadap *mean time to failure* (Seymour, 2000).

$$likelihood = \lambda \times total\ time\ operation.....(4.2)$$

$$likelihood = \frac{87600}{MTTF(hour)}.....(4.3)$$

Dimana waktu operasi diambil berdasarkan kurun waktu pengambilan data maintenance selama 10 tahun (87600 jam).

Berikut ini adalah perhitungan MTTF dari tiap-tiap komponen instrumentasi dan mekanikal pada turbin uap 105-JT yang dihitung dari data maintenance yang didapat dari perusahaan.

- PT 1009

Dengan mengolah data *maintenance*, kalibrasi dan servis pada PT 1009 ditentukan bahwa Distribusi *Time to failure*-nya merupakan distribusi eksponensial, sehingga:

$$MTTF = \frac{\sum TTF}{n} = \frac{19312 + 37384}{2} = 28348 \text{ hour}$$

- PZ 1009

Distribusi *time to failure* untuk PZ 1009 adalah distribusi adalah Normal, dengan parameter-parameter $\sigma = 4471,4$ dan $\mu = 12397$.

$$MTTF = \mu = 12397 \text{ hour}$$

- PT 1016

PT 1016 memiliki distribusi eksponensial untuk sebaran *time to failure*-nya, sehingga:

$$MTTF = \frac{\sum TTF}{n} = \frac{47848 + 34600}{2} = 41224 \text{ hour}$$

- PZ 1020

Setelah diolah data *time to failure* dari tiap-tiap kejadian kegagalan pada *Admission valve* maka didapatkan distribusi Normal sebagai sebaran MTTF PZ 1020.

$$MTTF = \frac{\sum TTF}{n} = \frac{1760 + 15944 + 57608}{3} = 25104 \text{ hour}$$

- TTV

Dengan 3 buah *maintenance* yang tercatat dilakukan pada komponen TTV maka ditentukan distribusi *Mean Time to Failure*-nya adalah menurut distribusi eksponensial.

$$MTTF = \frac{\sum TTF}{n} = \frac{8053,5 + 5451,7}{2} = 6753 \text{ hour}$$

- Gasket

Dengan mengolah data panjangnya selang waktu kerusakan yang ada pada komponen gasket didapatkan bahwa distribusi yang sesuai adalah distribusi Weibull 2-parameter.

Dengan $\alpha = 0,65581$ dan $\beta = 5223,2$

$$\begin{aligned} MTTF &= \beta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \\ &= 5223,2 \times \Gamma(1,3483) \\ &= 7042 \text{ hour} \end{aligned}$$

- **Nozzle**

Seringnya *maintenance* yang berupa penggantian komponen dan *service* membuat komponen *Nozzle* memiliki distribusi selang kerusakan yang berupa distribusi Weibull 3-parameter. Dimana nilai parameter-parameter tersebut masing-masing $\alpha = 3,0459$, $\beta = 8021,2$, $\gamma = 44,035$.

$$\begin{aligned} MTTF &= \gamma + \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \\ &= 44,035 + 8021,2 \times 0,89338 \\ &= 7210 \text{ hour} \end{aligned}$$

- **Labyrinth**

Hasil olah data *maintenance* mengindikasikan bahwa *time to failure* pada *Labyrinth* didekati dengan sebaran Normal dimana parameter-parameternya adalah $\sigma = 958,19$, $\mu = 8528,3$.

$$MTTF = \mu = 8528 \text{ hour}$$

- **Bearing**

Komponen mekanikal terakhir merupakan salah satu yang paling krusial karena berhubungan langsung dengan rotor turbin, sehingga memungkinkan seringnya terjadi *maintenance* baik penggantian maupun servis berat berkala. Oleh karena itu selang waktu kerusakan pada komponen *Bearing* pun cukup singkat dibanding dengan komponen lain. Didapati bahwa distribusi kegagalan pada bearing berupa sebaran lognormal yang mana memiliki nilai parameter $\sigma = 1,0107$, $\mu = 7,9355$, $\gamma = 1579$.

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \gamma + e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \\
 &= 1579 + 4657,61 \\
 &= 6237 \text{ hour}
 \end{aligned}$$

- SI 1005

Didapati bahwa SI 1005 memiliki distribusi *maintenance* berupa sebaran eksponensial, sehingga :

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \frac{\sum TTF}{n} = \frac{45256 + 4336 + 11632}{3} \\
 &= 20408 \text{ hour}
 \end{aligned}$$

- TI 1754

Dengan mengolah data *maintenance* elemen *monitoring* TI 1754 didapat bahwa distribusi TTF-nya menunjukkan distribusi eksponensial dengan perhitungan MTTF sebagai berikut:

$$MTTF = \frac{\sum TTF}{n} = \frac{34650 + 4242}{3} = 19446 \text{ hour}$$

- TA 1811

Oleh karena data *maintenance* TA 1811 yang tidak tersedia pada Dept. Pemeliharaan 1 sehingga data akan diambil dari *handbook* OREDA. Dimana dari OREDA didapatkan nilai $\lambda = 5,7 \times E-06$ /hour untuk jenis termokopel dan untuk jenis *failure on demand*.

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 175439 \text{ hour}$$

Dari data MTTF tiap-tiap komponen mekanikal dan instrumentasi yang di dapat, maka akan diketahui tingkat keterjadian/ *occurance* kegagalan dari komponen-komponen tersebut. Tingkat *occurance* yang terjadi pada selang aktu operasi tertentu maka bisa disebut sebagai nilai *likelihood* komponen.

Tabel 4.8 Kriteria Likelihood Node Steam Turbine 105-JT

<i>Instrument</i>	<i>MTTF (hour)</i>	<i>Likelihood (per 10 years)</i>
PT 1009	28348	3
PZ 1009	12397	7
PT 1016	41224	2
PZ 1020	25104	3
TTV	6753	6
<i>Gasket</i>	7042	12
<i>Nozzle</i>	7210	12
<i>Labyrinth</i>	8528	10
<i>Bearing</i>	6237	14
SI 1005	20408	4
TI 1754	19446	4
TA 1811	175439	0

Dari tabel 4.8 diatas, komponen-komponen yang memiliki tingkat keseringan tinggi untuk gagal adalah komponen-komponen mekanikal pada *steam turbine* 105-JT. Yang tertinggi diantaranya adalah *maintenance* pada komponen bearing yang kemungkinan keterjadiannya mencapai 14 kali dalam kurun waktu 10 tahun operasi. Yang mana akan dikategorikan pada tabel 4.9 berikut sebagai *poor component/ below standard*.

Tabel 4.9 Standar Likelihood Perusahaan

<i>Ranking</i>		Deskripsi
1	<i>Brand New Excellent</i>	Risiko jarang sekali muncul frekuensi kejadian kurang dari empat kali dalam 10 tahun
2	<i>Very Good / Good Serviceable</i>	Risiko terjadi 4-6 kali dalam 10 tahun
3	<i>Accepetable</i>	Risiko terjadi anatra 6-8 kali dalam 10 tahun
4	<i>Below Standard / Poor</i>	Risiko terjadi 8-20 kali dalam 10 tahun
5	<i>Bad/ Unacceptable</i>	Risiko terjadi 20 kali dalam 10 tahun

4.4.2 Penentuan *Consequences*

Consequences adalah segala bentuk kemungkinan dampak dari risiko yang timbul akibat adanya kegagalan atau penyimpangan pada proses atau operasi yang melewati batas kendali yang diinginkan. Nilai skala *consequences* ditentukan dengan mengikuti standar Kriteria Profil Konsekuensi Pabrik Amonia PT. Petrokimia Gresik. Berdasarkan data proses yang ada serta wawancara dengan operator serta pelaksana standar oprasional (SOP) lainnya di Pabrik Amonia dapat dilakukan penentuan tingkat keparahan sesuai dengan kategori *consequences* yang terdapat pada tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Kategori Konsekuensi

Ranking		Deskripsi
1	<i>Insigni ficant</i>	Sumber risiko (unsur/komponen/obyek dalam beraktifitas) tidak berdampak sama sekali, akibatnya tidak signifikan terhadap kelangsungan aktifitas, sehingga aktifitas tetap terlaksana
2	<i>Minor</i>	Sumber risiko (unsur/komponen/obyek dalam beraktifitas)berdampak kecil, akibatnya kecil terhadap kelangsungan aktifitas, sehingga aktifitas tetap masih terlaksana
3	<i>Moder ate</i>	Sumber risiko (unsur/komponen/obyek dalam beraktifitas) berdampak sedang, akibatnya sedang terhadap kelangsungan aktifitas, sehingga aktifitas tetap masih terlaksana
4	<i>Major</i>	Sumber risiko (unsur/komponen/obyek dalam beraktifitas) berdampak besar, akibatnya cukup signifikan terhadap kelangsungan aktifitas, namun aktifitas masih dapat terlaksana walaupun tidak optimal
5	<i>Catast rophic</i>	Sumber risiko (unsur/komponen/obyek dalam beraktifitas) berdampak sangat besar, akibatnya sangat signifikan terhadap kelangsungan aktifitas, sehingga aktifitas tidak dapat terlaksana

Berdasarkan kriteria *consequences* yang dibuat oleh PT. Petrokimia Gresik pada tabel 4.10 Diatas terlihat bahwa nilai skala 5 menunjukkan tingkatan *catastrophic*, dimana risiko akan berdampak besar sehingga aktifitas produksi harus dihentikan (*shutdown*).

4.4.3 Risk Ranking

Tahapan terakhir dalam analisis bahaya adalah dengan menentukan nilai skala *risk ranking*. *Risk ranking* didapat dengan mengalikan antara skala *likelihood* dengan skala *consequences*. Standar *risk ranking* yang digunakan pada Tugas Akhir ini mengikuti standar Kriteria *Risk Ranking* dari Departemen Produksi pabrik I PT. Petrokimia Gresik yang terdapat pada tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Risk Matriks Category

<i>Consequence/ Likelihood</i>	<i>1 Insignificant</i>	<i>2 Minor</i>	<i>3 Moderate</i>	<i>4 Major</i>	<i>5 Catastrophic</i>
<i>(1) Brand New Excellernt</i>	L1	L2	L3	L4	H5
<i>(2) Good</i>	L2	L4	M6	M8	H10
<i>(3) Acceptable</i>	L3	M6	M9	M12	H15
<i>(4) Below Standart/ Poor</i>	L4	M8	M12	H16	H20
<i>(5) Bad / Unacceptable</i>	M5	H10	H15	H20	H25

Dimana warna kuning menandaan tingkat bahaya rendah atau *low risk*, hijau berarti *medium risk*, sedangkan merah merupakan kategori tingkatan bahaya paling tinggi (*high risk*). Sebuah bahaya sangat berpotensi menimbulkan risiko yang besar apabila ia

bersifat *catastrophic* secara *consequence*, atau dalam kategori *bad/unacceptable* pada skala *likelihood*.

Tabel 4.12 *Risk Ranking Consequences*

Risks	C	L	RR
effected on flash drum 120 CF1, increasing/ decreasing pressure caused increasing/ decreasing temperature, ammonia vapor disturbed	5	1	M5
effected on flash drum 120 CF1, increasing/ decreasing pressure caused increasing/ decreasing temperature, ammonia vapor disturbed	5	1	M5
turbin work harder, maybe caused internal damage, overpressure	5	1	M5
turbin work not maximal, decreasing on efficiency	5	1	M5
Turbine operate in danger condition, high vibration, internal damage	2	3	M6
lack of steam in to 105-JT, compressor not working, steam turbine 105-JT trip	5	3	H15

Risks	C	L	RR
105-JT overspeed, plant trip and shutdown cause equipment damage High Speed Turbine - High Vibration - Internal Damage	5	3	H15
Low Speed, Low power Turbine, Low Power Compressor - Low Pressure on Discharge compressor	5	3	H15
increased speed, cause until overspeed on 105-JT, effected cause on mechanical damage	5	1	M5
loss efficiency on steam Turbine 105-JT	2	4	M8
high vibration occured on 105-JT, and caused the other mechanical damage	4	4	H16
loss efficiency on steam Turbine 105-JT	2	4	M8
high vibration and high temperature occured on 105-JT, and caused the other mechanical damage	4	4	H16

Risks	C	L	RR
105-JT overspeed, plant trip and shutdown cause equipment damage High Speed Turbine - High Vibration - Internal Damage	4	2	M8
Low Speed, Low power Turbine, Low Power Compressor - Low Pressure on Discharge compressor	4	2	M8
Decreasing temperature on 105-JT, maybe caused internal damage	2	2	L4
Decreasing quality of steam, decreased power of Turbine	2	2	L4
Decreased temperature on 105-JT, maybe caused internal damage	2	1	L2
Decreasing quality of steam, decreased power of Turbine	2	1	L2

Angka C merupakan skala *consequences* dari tiap-tiap risiko yang terjadi akibat kegagalan. Angka ini didapatkan dengan menganalisa akibat atau dampak yang ditimbulkan oleh suatu kegagalan terhadap kegiatan produksi serta keutuhan *plant* sebagaimana pada tabel 4.10. *Consequence* terbesar yang terdapat pada *steam turbine* 105-JT adalah dengan skala 5 (*catastrophic*), yakni manakala *loop* 1009 mengalami kerusakan, karena dengan ini maka *steam* akan terganggu dan mengakibatkan *shutdown* jika sampai pada kondisi kritis. Selain dari *loop* 1009, dampak besar lainnya juga timbul karena keausan pada bearing dan nozzle dengan skala 4. Kedua komponen ini akan menimbulkan efek *overvibration* dan *overttemperature* pada *steam turbine* 105-JT.

Dengan mengklasifikasi nilai *likelihood* pada Tabel 4.8 dengan kategori yang terdapat pada Tabel 4.9 maka akan didapatkan nilai skala pada kolom L Tabel 4.12. Dalam kolom tersebut didapat bahwasanya occurrence tertinggi ada pada komponen-komponen mekanikal yang bernilai 4 atau dikategorikan *poor component/below standard*.

4.5 Analisis HAZOP

Dari hasil analisis HAZOP yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa risiko yang dapat terjadi pada unit *Steam Turbine* 105-JT terbagi menjadi tiga kategori dengan persentase sebagai berikut :

Low (kuning) = 16,7 %

Medium (hijau) = 58,3 %

High (merah) = 25 %

Dimana kerusakan-kerusakan yang tergolong dalam kategori *high risk* pada *steam turbine* 105-JT berdasarkan analisa di atas adalah disebabkan oleh kegagalan pada *governor valve* dan kerusakan pada komponen *bearing* dan *nozzle*. Kegagalan-kegagalan tersebut akan dianalisa menggunakan LOPA untuk menentukan tingkatan SIL yang digunakan serta untuk merekomendasi tindakan yang dapat mereduksi risiko dan dampak kegagalan melalui peningkatan nilai SIL.

4.6 *Layer of Protection Analysis (LOPA)*

Protection layer yang akan dianalisis terdiri dari *general process design*, *Basic Process Control System (BPCS)*, *alarm*, serta *additional mitigation layer*. *General process design* merupakan elemen paling dasar dalam jalannya proses, yakni dengan mendesain bagaimana desain terbaik dari sebuah sistem, sehingga kapasitas serta keandalannya sesuai dengan proses atau kondisi dimana ia akan bekerja. Dikatakan suatu proses memiliki sebuah *general design process* apabila telah terdapat PFD dan PID yang telah menyertakannya dalam alur proses.

BPCS merupakan salah satu *protection layer* yang bertujuan untuk memonitoring serta mengendalikan jalannya sebuah proses. Jalannya proses senantiasa dievaluasi melalui *set point* yang sudah ditetapkan perusahaan. BPCS merupakan salah satu layer yang paling signifikan dalam kaitannya meminimalisir kegagalan sistem. BPCS dikatakan terpasang apabila terdapat *element sensor*, *logic solver* dan *final element*.

Alarm adalah *protection layer* tingkat selanjutnya setelah BPCS. Alarm dapat terhubung maupun terpisah dengan BPCS. Alarm akan berbunyi manakala sistem mengindikasikan adanya penyimpangan proses diluar batas toleransi perusahaan, alarm tersebut dapat berupa HH (*high-high*) dan LL (*low-low*). Untuk ketiga *independent protection layer* tersebut akan memiliki nilai PFD sebesar 10^{-1} apabila masing-masing aktif bekerja dan akan bernilai 1 jika tidak terpasang atau tidak tersedia (Lassen, 2008; Frederickson, 2002).

Sedangkan *Additional mitigation layer* merupakan salah satu *protection layer* yang biasa berupa *Safety Instrumented System (SIS)*. Apabila *process control system* gagal melakukan tugas dalam upayanya mengamankan jalannya operasi dan keselamatan komponen serta sistem, maka SIS secara otomatis akan aktif bekerja untuk melindungi *plant* dari kemungkinan terjadinya kerusakan yang lebih parah. Adapun *Additional mitigation* pertama berupa *human performance on restricted area*, yang mana besarnya PFD untuk *under stress performance* bernilai 0,5. Yang kedua adalah *high integrity additional mitigation*, disini berupa

PRV atau *pressure relief valve* yang berfungsi untuk perlindungan akhir dari kemungkinan bahaya yang lebih besar diakibatkan oleh *overpressure* pada *plant*. PFD yang diberikan untuk instalasi PRV bernilai 10^{-2} (Lassen, 2008; Frederickson, 2002).

Terlebih dahulu langkah sebelum menentukan *Probability Failure On Demand* (PFD) adalah menentukan *Initiating Caused Likelihood* (ICL), Tabel 4.13 berikut merupakan perhitungan ICL untuk setiap kerusakan. Dengan ICL merupakan events per year (Lassen, 2008).

$$ICL = \frac{\text{likelihood (10 years)}}{10 \text{ years}} \dots\dots\dots(4.4)$$

Tabel 4.13 Hasil ICL

Impact Event Description	Initiating Cause	MTTF (hour)	ICL (per year)
105-JT overspeed - High Vibration - Internal Damage – Trip Plant and Shutdown	More flow steam	12405	0,7
Lack of Steam in to 105-JT - Low Speed - Low Power Turbine - Low Power Compressor - Low Pressure on Discharge compressor	Less flow steam or failed to open	12405	0,7
High Vibration and High Temperature Occured on 105-JT - Caused the other mechanical damage	Nozzle Aus	7210	1,2
	Bearing Aus	6237	1,4

4.6.1 Perhitungan LOPA

❖ **Impact Event Description** : 105-JT Overspeed - High Vibration - Internal Damage – Trip Plant and shutdown;
(Merupakan kategori risk atau dampak yang akan dianalisa)

Initiating Cause : More flow steam

(Merupakan penyebab terjadinya suatu *impact event*)

ICL = 0,7

(Keterjadian penyebab kegagalan dalam waktu 1 tahun)

Layer Proteksi :

- *Process Design* = 0,1
(*steam turbine 105-JT* telah didesain dengan kecepatan putar maximum yang spesifik)
- *BPCS* = 0,1
(telah terdapat *loop 1009* yang berfungsi untuk mengatur jumlah masukan *steam*)
- *Alarm* = 0,1
(terpasang *Speed Alarm High-High* pada *steam turbine 105-JT*)
- *Additional mitigation, Restricted access* = 0,5
(*human performance, under stress*)
- *Additional mitigation, Dike (Bunds), PRV* = 0,01
(terdapat *safety valve* berupa TTV dan PRV)
- $IEL = ICL \times PFD_1 \times PFD_2 \times \dots \times PFD_n$
 $IEL = 0,7 \times 0,1 \times 0,1 \times 1 \times 0,5 \times 0,01$
 $IEL = 3,5 \times 10^{-6}$
 (*Intermediate event likelihood* = frekuensi per tahun dari keterjadian *impact event*)[15]

$$PFD_{avg} = \frac{TMEL}{IEL} \text{ dengan } TMEL = 1 \times 10^{-5}$$

(*Target mitigated Event Likelihood* = nilai penurunan *likelihood* yang ingin dicapai. Ditentukan berdasarkan *severity level*)

$$PFD_{avg} = 2,85714$$

Berdasarkan hasil rasio LOPA diatas, maka nilai SIL didapatkan sebagai **NO REQUIREMENT(NR) SIL**.

❖ ***Impact Event Description*** : *Lack of Steam in to 105-JT - Low Speed - Low power Turbine - Low Power Compressor - Low Pressure on Discharge compressor*

Initiating Cause : *Less flow steam or PZ 1009 failed to open*

$$ICL = 0,7$$

Layer Proteksi :

- *Process Design* = 0,1
- *BPCS* = 0,1
- *Alarm* = 1

- *Additional mitigation, Restricted access* = 0,5 (*human performance, under stress*)

- *Additional mitigation, Dike (Bunds), PRV* = 0,01

$$IEL = ICL \times PFD_1 \times PFD_2 \times \dots \times PFD_n$$

$$IEL = 0,7 \times 0,1 \times 0,1 \times 1 \times 0,5 \times 0,01$$

$$IEL = 3,5 \times 10^{-5}$$

$$PFD_{avg} = \frac{TMEL}{IEL} \text{ dengan } TMEL = 1 \times 10^{-5}$$

$$PFD_{avg} = 0,28571$$

Berdasarkan hasil rasio LOPA diatas, maka nilai SIL didapatkan sebagai **SIL 0**.

- ❖ **Impact Event Description** : *High Vibration and High Temperature Occured on 105-JT, and Caused the Other Mechanical Damage*

Initiating Cause (1) : Nozzle aus

$$ICL = 1,2$$

Layer Proteksi :

- *Process Design* = 0,1

- *BPCS* = 1

- *Alarm* = 1

- *Additional mitigation, Restricted access* : 0,5 (*human performance, under stress*)

- *Additional mitigation, Dike (Bunds), PRV* = 0,01

$$IEL = ICL \times PFD_1 \times PFD_2 \times \dots \times PFD_n$$

$$IEL = 1,2 \times 0,1 \times 0,1 \times 1 \times 0,5 \times 0,01$$

$$IEL = 6 \times 10^{-4}$$

$$PFD_{avg} = \frac{TMEL}{IEL} \text{ dengan } TMEL = 1 \times 10^{-5}$$

$$PFD_{avg} = 0,01667$$

Berdasarkan hasil rasio LOPA diatas, maka nilai SIL didapatkan sebagai **SIL 1**.

- ❖ **Impact Event Description** : *High Vibration and High Temperature Occured on 105-JT, and Caused the Other Mechanical Damage*

Initiating Cause (2) : Bearing Aus

$$\text{ICL} = 1,4$$

Layer Proteksi :

- *Process Design* = 0,1
- *BPCS* = 1
- *Alarm* = 1
- *Additional mitigation, Restricted access* : 0,5 (*human performance, under stress*)
- *Additional mitigation, Dike (Bunds), PRV* = 0,01

$$\text{IEL} = \text{ICL} \times \text{PFD}_1 \times \text{PFD}_2 \times \dots \times \text{PFD}_n$$

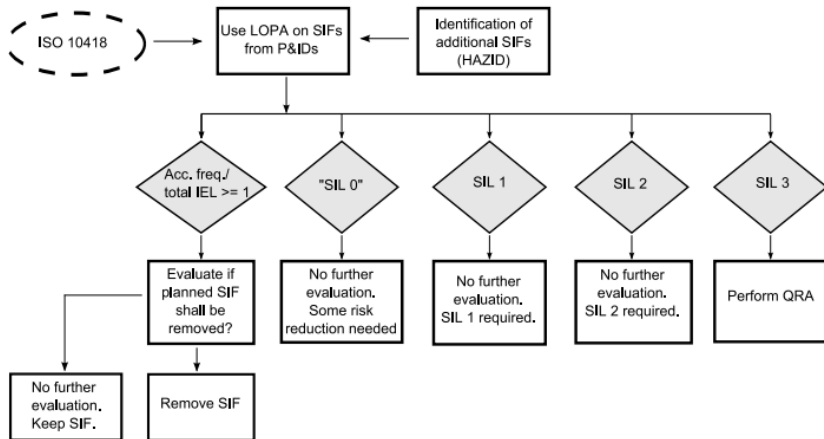
$$\text{IEL} = 1,40461 \times 0,1 \times 0,1 \times 1 \times 0,5 \times 0,01$$

$$\text{IEL} = 7 \times 10^{-4}$$

$$\text{PFD avg} = \frac{\text{TMEL}}{\text{IEL}} \text{ dengan TMEL} = 1 \times 10^{-5}$$

$$\text{PFD avg} = 0,01429$$

Berdasarkan hasil rasio LOPA diatas, maka nilai SIL didapatkan sebagai **SIL 1**.



Gambar 4.11 *Evaluation and Recommendation Flowchart*[13]

Dengan berdasarkan perhitungan diatas dan pada tabel standar LOPA pada lampiran B, maka didapatkan bahwa nilai SIL untuk tiap *Impact event* bervariasi antara NR, SIL 0 dan SIL 1. Yakni dengan persentase sebesar NR= 25%, SIL 0= 25%, dan SIL

1= 50%. Hasil tersebut akan dianalisa kembali menggunakan *flowchart* pada gambar 4.11 diatas untuk mendapatkan rekomendasi yang sesuai yang dapat digunakan untuk mereduksi risiko kegagalan pada *steam turbine* 105-JT.

Dimana untuk keadaan yang menunjukkan SIL 3 maka rekomendasinya adalah dilakukan analisis ulang menggunakan QRA (*Quantitative Risk Assessment*). Sedangkan untuk NR maka *no requirement of additional layer* atau tidak diperlukan adanya penambahan *protection layer*.

Sementara untuk hasil analisa yang menunjukkan hasil nilai SIL 0 dan SIL 1 maka hal ini menunjukan bahwa bahaya yang timbul akibat kegagalan proses dapat direduksi dengan penambahan *protection layer*. Untuk meningkatkan SIL atau meningkatkan nilai reduksi resiko maka dilakukan penambahan *layer* proteksi sebagai berikut :

- BPCS untuk pengendalian variabel temperatur dan *Temperature Alarm High High* pada Turbin 105-JT
- *Speed Alarm Low Low* pada SI 1005

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Hasil analisis HAZOP pada *Steam Turbine* 105-JT didapatkan resiko bahaya dengan tiga kategori *risk ranking* yaitu :

Rendah = 16.7 %

Menengah = 58.3%

Tinggi = 25%

- b. Nilai SIF *Integrity Level* pada *Steam Turbine* 105-JT PT. Petrokimia Gresik menunjukkan nilai bervariasi dari NR, SIL 0, hingga SIL 1 untuk *High Risk Consequences Hazard*. Dengan persentase 25% NR, 25% SIL 0, dan 50% untuk SIL 1.
- c. Untuk meningkatkan nilai SIL atau kebutuhan reduksi risiko pada metode LOPA, maka rekomendasi yang diberikan adalah dengan menambahkan *Speed Alarm LL* pada SI 1005, dan BPCS pengendalian temperatur 105-JT beserta *Temperature Alarm HH* pada *Steam Turbine* 105-JT.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berkaitan dengan keamanan sistem pada PT. Petrokimia Gresik yaitu :

- a. Penerapan *preventive maintenance* yang merata terhadap semua komponen untuk mendeteksi lebih awal dari ketidaksesuaian jalannya proses yang disebabkan oleh kegagalan/ kerusakan alat instrumentas dan komponen mekanik yang terpasang sehingga dapat mereduksi angka *failure rate* dari seluruh komponen instrumentasi yang terpasang.

- b. Pencatatan data *logsheet* proses baiknya agar dilakukan untuk setiap elemen instrumentasi yang ada agar didapatkan *record data* proses yang lebih akurat sehingga penyimpangan yang terjadi dalam proses selalu dapat terdeteksi lebih awal.
- c. Dapat dilakukan penelitian yang sama pada *Plant* 101-JT dan 103-JT.

Daftar Pustaka

- Anshori, N. Dan Mustajib, M. I. 2013. **Sistem Perawatan Terpadu (Integrated Maintenance System)**, Edisi Pertama. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Cassiolato, C. 2012. **SIS: Safety Instrumented System - A Practical View**. Brazil: *SMAR Industrial Automation*.
- Ebeling, C. E. 1997. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**, 1st ed, Singapore: McGraw-Hill Companies.
- Frederickson, A. A. 2002. **The Layer of Protection Analysis (LOPA) Method**. Safety Users Group Network.
- Hatch, D. dan Stauffer, T. 2009. **Operators on Alert**.
<URL:<http://www.isa.org>>
- Indriawati, K. 2007. "Penggunaan Teknik Rekonsiliasi Data dan Sistem Inferensi Fuzzy untuk Perbaikan Performansi *Statistical Process Control*". **Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.
- Johnson, R. W. 2010. "Beyond-Compliance Uses HAZOP/ LOPA Studies". **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 23:727-733.
- King, A. G. 2013. "SIL Determination: Dealing with Unexpected". **AIDIC**.
- Lassen, C. A. 2008. **Layer of protection analysis (LOPA) for determination of safety integrity level (SIL)**. Norwegian: The Norwegian University of Science and Technology
- Leitch, R. D. 1995. **Reliability Analysis for Engineers**. New York: Oxford University Press, Inc.
- Marszal, E. et al. 2014. **PHA, LOPA, and QRA**.
<URL:<http://www.kenexis.com>>
- Mitsubishi. 1994. **Steam Turbine 105-JT 5MXL Model Datasheet**. Japan: Mitsubishi Heavy Industry Manufacturer.
- Montgomery, D. C. 2009. **Introduction to Statistical Quality Control (Sixth Edition)**. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- NIST/SEMATECH. 2012. **e-Handbook of Statistical Methods**.
<URL:<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>

- Nolan, D. P. 1994. **Application of HAZOP and What-if Safety Reviews to the Petroleum, Petrochemical and Chemical Industries**. New Jersey: Noyes Publications.
- Priyanta, D. 2000. **Keandalan dan Perawatan, Edisi 1**. Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Rausand, M. 2004. **HAZOP Hazard and Operability Study, In System Reliability Theory, 2nd ed (pp. 1-44)**. Norwegian: Department of Production and Quality Engineering University of Sciece and Technology.
- Seymour, B. 2000. **MTTF, FAILRATE, RELIABILITY AND LIFE TESTING**. USA: Burr-Brown Corporation.
- Zhou, J. 2013. **Determination of Safety/ Environmental Integrity Level for Subsea Safety Instrumented Systems**. NTNU-Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

LAMPIRAN A1

TABEL *GAMMA FUNCTION* $\Gamma(x)$

c	$\Gamma(x)$	c	$\Gamma(x)$	c	$\Gamma(x)$	c	$\Gamma(x)$
1.01	0.99433	1.51	0.88659	2.01	1.00427	2.51	1.33875
1.02	0.98884	1.52	0.88704	2.02	1.00862	2.52	1.34830
1.03	0.98355	1.53	0.88757	2.03	1.01306	2.53	1.35798
1.04	0.97844	1.54	0.88818	2.04	1.01758	2.54	1.36779
1.05	0.97350	1.55	0.88887	2.05	1.02218	2.55	1.37775
1.06	0.96874	1.56	0.88964	2.06	1.02687	2.56	1.38784
1.07	0.96415	1.57	0.89049	2.07	1.03164	2.57	1.39807
1.08	0.95973	1.58	0.89142	2.08	1.03650	2.58	1.40844
1.09	0.95546	1.59	0.89243	2.09	1.04145	2.59	1.41896
1.10	0.95153	1.60	0.89352	2.10	1.04649	2.60	1.42962
1.11	0.94740	1.61	0.89468	2.11	1.05161	2.61	1.44044
1.12	0.94359	1.62	0.89592	2.12	1.05682	2.62	1.45140
1.13	0.93993	1.63	0.89724	2.13	1.06212	2.63	1.46251
1.14	0.93642	1.64	0.89864	2.14	1.06751	2.64	1.47377
1.15	0.93304	1.65	0.90012	2.15	1.07300	2.65	1.48519
1.16	0.92980	1.66	0.90167	2.16	1.07857	2.66	1.49677
1.17	0.92670	1.67	0.90330	2.17	1.08424	2.67	1.50851
1.18	0.92373	1.68	0.90500	2.18	1.09000	2.68	1.52040
1.19	0.92089	1.69	0.90678	2.19	1.09585	2.69	1.53246
1.20	0.91817	1.70	0.90864	2.20	1.10180	2.70	1.54469
1.21	0.91558	1.71	0.91057	2.21	1.10785	2.71	1.55708
1.22	0.91311	1.72	0.91258	2.22	1.11399	2.72	1.56964
1.23	0.91075	1.73	0.91467	2.23	1.12023	2.73	1.58237
1.24	0.90852	1.74	0.91683	2.24	1.12657	2.74	1.59528
1.25	0.90640	1.75	0.91906	2.25	1.13300	2.75	1.60836
1.26	0.90440	1.76	0.92137	2.26	1.13954	2.76	1.62162
1.27	0.90250	1.77	0.92376	2.27	1.14618	2.77	1.63506
1.28	0.90072	1.78	0.92623	2.28	1.15292	2.78	1.64868
1.29	0.89904	1.79	0.92877	2.29	1.15976	2.79	1.66249
1.30	0.89747	1.80	0.93138	2.30	1.16671	2.80	1.67649
1.31	0.89600	1.81	0.93408	2.31	1.17377	2.81	1.69068
1.32	0.89464	1.82	0.93685	2.32	1.18093	2.82	1.70506
1.33	0.89338	1.83	0.93969	2.33	1.18819	2.83	1.71963
1.34	0.89222	1.84	0.94261	2.34	1.19557	2.84	1.73441
1.35	0.89115	1.85	0.94561	2.35	1.20305	2.85	1.74938
1.36	0.89018	1.86	0.94869	2.36	1.21065	2.86	1.76456
1.37	0.88931	1.87	0.95184	2.37	1.21836	2.87	1.77994
1.38	0.88854	1.88	0.95507	2.38	1.22618	2.88	1.79553
1.39	0.88785	1.89	0.95838	2.39	1.23412	2.89	1.81134
1.40	0.88726	1.90	0.96177	2.40	1.24217	2.90	1.82736
1.41	0.88676	1.91	0.96523	2.41	1.25034	2.91	1.84359
1.42	0.88636	1.92	0.96877	2.42	1.25863	2.92	1.86005
1.43	0.88604	1.93	0.97240	2.43	1.26703	2.93	1.87673
1.44	0.88581	1.94	0.97610	2.44	1.27556	2.94	1.89363
1.45	0.88566	1.95	0.97988	2.45	1.28421	2.95	1.91077
1.46	0.88560	1.96	0.98374	2.46	1.29298	2.96	1.92814
1.47	0.88563	1.97	0.98769	2.47	1.30188	2.97	1.94574
1.48	0.88575	1.98	0.99171	2.48	1.31091	2.98	1.96358
1.49	0.88595	1.99	0.99581	2.49	1.32006	2.99	1.98167
1.50	0.88623	2.00	1.00000	2.50	1.32934	3.00	2.00000

Sumber : Ebeling, C.E., *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*,
Mc Graw-Hill, New York, 1997

LAMPIRAN A2

TABEL *STANDARDIZED NORMAL PROBABILITIES* $\Phi(z)$

$$= \int_{-\infty}^z (1/\sqrt{2\pi})^{-y/2} dy$$

z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$
-4.0000	0.00003	0.99997	-3.51000	0.00022	0.99978	-3.02000	0.00126	0.99874
-3.99000	0.00003	0.99997	-3.50000	0.00023	0.99977	-3.01000	0.00131	0.99869
-3.98000	0.00003	0.99997	-3.49000	0.00024	0.99976	-3.00000	0.00131	0.99869
-3.97000	0.00004	0.99996	-3.48000	0.00025	0.99975	-2.99000	0.00139	0.99861
-3.96000	0.00004	0.99996	-3.47000	0.00026	0.99974	-2.98000	0.00144	0.99856
-3.95000	0.00004	0.99996	-3.46000	0.00027	0.99973	-2.97000	0.00149	0.99851
-3.94000	0.00004	0.99996	-3.45000	0.00028	0.99972	-2.96000	0.00154	0.99846
-3.93000	0.00004	0.99996	-3.44000	0.00029	0.99971	-2.95000	0.00159	0.99841
-3.92000	0.00004	0.99996	-3.43000	0.00030	0.99970	-2.94000	0.00164	0.99836
-3.91000	0.00005	0.99995	-3.42000	0.00031	0.99969	-2.93000	0.00169	0.99831
-3.90000	0.00005	0.99995	-3.41000	0.00032	0.99968	-2.92000	0.00175	0.99825
-3.89000	0.00005	0.99995	-3.40000	0.00034	0.99966	-2.91000	0.00181	0.99819
-3.88000	0.00005	0.99995	-3.39000	0.00035	0.99965	-2.90000	0.00187	0.99813
-3.87000	0.00005	0.99995	-3.38000	0.00036	0.99964	-2.89000	0.00193	0.99807
-3.86000	0.00006	0.99994	-3.37000	0.00038	0.99962	-2.88000	0.00199	0.99801
-3.85000	0.00006	0.99994	-3.36000	0.00039	0.99961	-2.87000	0.00205	0.99795
-3.84000	0.00006	0.99994	-3.35000	0.00040	0.99960	-2.86000	0.00212	0.99788
-3.83000	0.00006	0.99994	-3.34000	0.00042	0.99958	-2.85000	0.00219	0.99781
-3.82000	0.00007	0.99993	-3.33000	0.00043	0.99957	-2.84000	0.00226	0.99774
-3.81000	0.00007	0.99993	-3.32000	0.00045	0.99955	-2.83000	0.00233	0.99767
-3.80000	0.00007	0.99993	-3.31000	0.00047	0.99953	-2.82000	0.00240	0.99760
-3.79000	0.00008	0.99992	-3.30000	0.00048	0.99952	-2.81000	0.00248	0.99752
-3.78000	0.00008	0.99992	-3.29000	0.00050	0.99950	-2.80000	0.00255	0.99745
-3.77000	0.00008	0.99992	-3.28000	0.00052	0.99948	-2.79000	0.00264	0.99736
-3.76000	0.00008	0.99992	-3.27000	0.00054	0.99946	-2.78000	0.00272	0.99728
-3.75000	0.00009	0.99991	-3.26000	0.00056	0.99944	-2.77000	0.00280	0.99720
-3.74000	0.00009	0.99991	-3.25000	0.00058	0.99942	-2.76000	0.00289	0.99711
-3.73000	0.00009	0.99991	-3.24000	0.00060	0.99940	-2.75000	0.00298	0.99702
-3.72000	0.00010	0.99990	-3.23000	0.00062	0.99938	-2.74000	0.00307	0.99693
-3.71000	0.00010	0.99990	-3.22000	0.00064	0.99936	-2.73000	0.00317	0.99683
-3.70000	0.00011	0.99989	-3.21000	0.00066	0.99934	-2.72000	0.00326	0.99674
-3.69000	0.00011	0.99989	-3.20000	0.00069	0.99931	-2.71000	0.00336	0.99664
-3.68000	0.00012	0.99988	-3.19000	0.00071	0.99929	-2.70000	0.00347	0.99653
-3.67000	0.00012	0.99988	-3.18000	0.00074	0.99926	-2.69000	0.00357	0.99643
-3.66000	0.00013	0.99987	-3.17000	0.00076	0.99924	-2.68000	0.00368	0.99632
-3.65000	0.00013	0.99987	-3.16000	0.00079	0.99921	-2.67000	0.00379	0.99621
-3.64000	0.00014	0.99986	-3.15000	0.00082	0.99918	-2.66000	0.00391	0.99609
-3.63000	0.00014	0.99986	-3.14000	0.00084	0.99916	-2.65000	0.00402	0.99598
-3.62000	0.00015	0.99985	-3.13000	0.00087	0.99913	-2.64000	0.00415	0.99585
-3.61000	0.00015	0.99985	-3.12000	0.00090	0.99910	-2.63000	0.00427	0.99573
-3.60000	0.00016	0.99984	-3.11000	0.00094	0.99906	-2.62000	0.00440	0.99560
-3.59000	0.00016	0.99984	-3.10000	0.00097	0.99903	-2.61000	0.00453	0.99547
-3.58000	0.00017	0.99983	-3.09000	0.00100	0.99900	-2.60000	0.00466	0.99534
-3.57000	0.00018	0.99982	-3.08000	0.00103	0.99897	-2.59000	0.00480	0.99520
-3.56000	0.00019	0.99981	-3.07000	0.00107	0.99893	-2.58000	0.00494	0.99506
-3.55000	0.00019	0.99981	-3.06000	0.00111	0.99889	-2.57000	0.00508	0.99492
-3.54000	0.00020	0.99980	-3.05000	0.00114	0.99886	-2.56000	0.00523	0.99477
-3.53000	0.00021	0.99979	-3.04000	0.00118	0.99882	-2.55000	0.00539	0.99461
-3.52000	0.00022	0.99978	-3.03000	0.00122	0.99878	-2.54000	0.00554	0.99446

Sumber : *Ebeling, C.E, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering , continued*
Mc Graw-Hill New York 1997

z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$
-2.53000	0.00570	0.99430	-2.03000	0.02118	0.97882	-1.53000	0.06301	0.93699
-2.52000	0.00587	0.99413	-2.02000	0.02169	0.97831	-1.52000	0.06426	0.93574
-2.51000	0.00604	0.99396	-2.01000	0.02222	0.97778	-1.51000	0.06552	0.93448
-2.50000	0.00621	0.99379	-2.00000	0.02275	0.97725	-1.50000	0.06681	0.93319
-2.49000	0.00639	0.99361	-1.99000	0.02330	0.97670	-1.49000	0.06811	0.93189
-2.48000	0.00657	0.99343	-1.98000	0.02385	0.97615	-1.48000	0.06944	0.93056
-2.47000	0.00676	0.99324	-1.97000	0.02442	0.97558	-1.47000	0.07078	0.92922
-2.46000	0.00695	0.99305	-1.96000	0.02500	0.97500	-1.46000	0.07215	0.92785
-2.45000	0.00714	0.99286	-1.95000	0.02559	0.97441	-1.45000	0.07353	0.92647
-2.44000	0.00734	0.99266	-1.94000	0.02619	0.97381	-1.44000	0.07493	0.92507
-2.43000	0.00755	0.99245	-1.93000	0.02680	0.97320	-1.43000	0.07636	0.92364
-2.42000	0.00776	0.99224	-1.92000	0.02743	0.97257	-1.42000	0.07780	0.92220
-2.41000	0.00798	0.99202	-1.91000	0.02807	0.97193	-1.41000	0.07927	0.92073
-2.40000	0.00820	0.99180	-1.90000	0.02872	0.97128	-1.40000	0.08076	0.91924
-2.39000	0.00842	0.99158	-1.89000	0.02938	0.97062	-1.39000	0.08226	0.91774
-2.38000	0.00866	0.99134	-1.88000	0.03005	0.96995	-1.38000	0.08379	0.91621
-2.37000	0.00889	0.99111	-1.87000	0.03074	0.96926	-1.37000	0.08534	0.91466
-2.36000	0.00914	0.99086	-1.86000	0.03144	0.96856	-1.36000	0.08692	0.91308
-2.35000	0.00939	0.99061	-1.85000	0.03216	0.96784	-1.35000	0.08851	0.91149
-2.34000	0.00964	0.99036	-1.84000	0.03288	0.96712	-1.34000	0.09012	0.90988
-2.33000	0.00990	0.99010	-1.83000	0.03362	0.96638	-1.33000	0.09176	0.90824
-2.32000	0.01017	0.98983	-1.82000	0.03438	0.96562	-1.32000	0.09342	0.90658
-2.31000	0.01044	0.98956	-1.81000	0.03515	0.96485	-1.31000	0.09510	0.90490
-2.30000	0.01072	0.98928	-1.80000	0.03593	0.96407	-1.30000	0.09680	0.90320
-2.29000	0.01101	0.98899	-1.79000	0.03673	0.96327	-1.29000	0.09853	0.90147
-2.28000	0.01130	0.98870	-1.78000	0.03754	0.96246	-1.28000	0.10027	0.89973
-2.27000	0.01160	0.98840	-1.77000	0.03836	0.96164	-1.27000	0.10204	0.89796
-2.26000	0.01191	0.98809	-1.76000	0.03920	0.96080	-1.26000	0.10383	0.89617
-2.25000	0.01222	0.98778	-1.75000	0.04006	0.95994	-1.25000	0.10565	0.89435
-2.24000	0.01255	0.98745	-1.74000	0.04093	0.95907	-1.24000	0.10749	0.89251
-2.23000	0.01287	0.98713	-1.73000	0.04182	0.95818	-1.23000	0.10935	0.89065
-2.22000	0.01321	0.98679	-1.72000	0.04272	0.95728	-1.22000	0.11123	0.88877
-2.21000	0.01355	0.98645	-1.71000	0.04363	0.95637	-1.21000	0.11314	0.88686
-2.20000	0.01390	0.98610	-1.70000	0.04457	0.95543	-1.20000	0.11507	0.88493
-2.19000	0.01426	0.98574	-1.69000	0.04551	0.95449	-1.19000	0.11702	0.88298
-2.18000	0.01463	0.98537	-1.68000	0.04648	0.95352	-1.18000	0.11900	0.88100
-2.17000	0.01500	0.98500	-1.67000	0.04746	0.95254	-1.17000	0.12100	0.87900
-2.16000	0.01539	0.98461	-1.66000	0.04846	0.95154	-1.16000	0.12302	0.87698
-2.15000	0.01578	0.98422	-1.65000	0.04947	0.95053	-1.15000	0.12507	0.87493
-2.14000	0.01618	0.98382	-1.64000	0.05050	0.94950	-1.14000	0.12714	0.87286
-2.13000	0.01659	0.98341	-1.63000	0.05155	0.94845	-1.13000	0.12924	0.87076
-2.12000	0.01700	0.98300	-1.62000	0.05262	0.94738	-1.12000	0.13136	0.86864
-2.11000	0.01743	0.98257	-1.61000	0.05370	0.94630	-1.11000	0.13350	0.86650
-2.10000	0.01786	0.98214	-1.60000	0.05480	0.94520	-1.10000	0.13567	0.86433
-2.09000	0.01831	0.98169	-1.59000	0.05592	0.94408	-1.09000	0.13786	0.86214
-2.08000	0.01876	0.98124	-1.58000	0.05705	0.94295	-1.08000	0.14007	0.85993
-2.07000	0.01923	0.98077	-1.57000	0.05821	0.94179	-1.07000	0.14231	0.85769
-2.06000	0.01970	0.98030	-1.56000	0.05938	0.94062	-1.06000	0.14457	0.85543
-2.05000	0.02018	0.97982	-1.55000	0.06057	0.93943	-1.05000	0.14686	0.85314
-2.04000	0.02067	0.97932	-1.54000	0.06178	0.93822	-1.04000	0.14917	0.85083

continued

z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$
-1.03000	0.151505	0.848495	-0.53000	0.2980559	0.7019441	-0.03000	0.48803	0.51197
-1.02000	0.1538642	0.8461358	-0.52000	0.3015318	0.6984682	-0.02000	0.49202	0.50798
-1.01000	0.1562477	0.8437523	-0.51000	0.3050257	0.6949743	-0.01000	0.49601	0.50399
-1.00000	0.1586553	0.8413447	-0.50000	0.3085375	0.6914625	0.00000	0.50000	0.50000
-0.99000	0.1610871	0.8389129	-0.49000	0.3120669	0.6879331	0.01000	0.50399	0.49601
-0.98000	0.1635431	0.8364569	-0.48000	0.3156137	0.6843863	0.02000	0.50798	0.49202
-0.97000	0.1660232	0.8339768	-0.47000	0.3191775	0.6808225	0.03000	0.51197	0.48803
-0.96000	0.1685276	0.8314724	-0.46000	0.3227581	0.6772419	0.04000	0.51595	0.48405
-0.95000	0.1710561	0.8289439	-0.45000	0.3263552	0.6736448	0.05000	0.51994	0.48006
-0.94000	0.1736088	0.8263912	-0.44000	0.3299686	0.6700314	0.06000	0.52392	0.47608
-0.93000	0.1761855	0.8238145	-0.43000	0.3335979	0.6664021	0.07000	0.52790	0.47210
-0.92000	0.1787864	0.8212136	-0.42000	0.3372428	0.6627572	0.08000	0.53188	0.46812
-0.91000	0.1814112	0.8185888	-0.41000	0.340903	0.659097	0.09000	0.53586	0.46414
-0.90000	0.1840601	0.8159399	-0.40000	0.3445783	0.6554217	0.10000	0.53983	0.46017
-0.89000	0.1867329	0.8132671	-0.39000	0.3482683	0.6517317	0.11000	0.54380	0.45620
-0.88000	0.1894296	0.8105704	-0.38000	0.3519728	0.6480272	0.12000	0.54776	0.45224
-0.87000	0.1921502	0.8078498	-0.37000	0.3556913	0.6443087	0.13000	0.55172	0.44828
-0.86000	0.1948945	0.8051055	-0.36000	0.3594236	0.6405764	0.14000	0.55567	0.44433
-0.85000	0.1976625	0.8023375	-0.35000	0.3631694	0.6368306	0.15000	0.55962	0.44038
-0.84000	0.2004541	0.7995459	-0.34000	0.3669283	0.6330717	0.16000	0.56356	0.43644
-0.83000	0.2032693	0.7967307	-0.33000	0.3707	0.6293	0.17000	0.56749	0.43251
-0.82000	0.206108	0.793892	-0.32000	0.3744842	0.6255158	0.18000	0.57142	0.42858
-0.81000	0.20897	0.79103	-0.31000	0.3782805	0.6217195	0.19000	0.57535	0.42465
-0.80000	0.2118553	0.7881447	-0.30000	0.3820886	0.6179114	0.20000	0.57926	0.42074
-0.79000	0.2147638	0.7852362	-0.29000	0.3859082	0.6140918	0.21000	0.58317	0.41683
-0.78000	0.2176954	0.7823046	-0.28000	0.3897388	0.6102612	0.22000	0.58706	0.41294
-0.77000	0.2206499	0.7793501	-0.27000	0.3935802	0.6064198	0.23000	0.59095	0.40905
-0.76000	0.2236272	0.7763728	-0.26000	0.3974319	0.6025681	0.24000	0.59483	0.40517
-0.75000	0.2266273	0.7733727	-0.25000	0.4012937	0.5987063	0.25000	0.59871	0.40129
-0.74000	0.2296499	0.7703501	-0.24000	0.4051652	0.5948348	0.26000	0.60257	0.39743
-0.73000	0.232695	0.767305	-0.23000	0.4090459	0.5909541	0.27000	0.60642	0.39358
-0.72000	0.2357624	0.7642376	-0.22000	0.4129356	0.5870644	0.28000	0.61026	0.38974
-0.71000	0.238852	0.761148	-0.21000	0.4168339	0.5831661	0.29000	0.61409	0.38591
-0.70000	0.2419636	0.7580364	-0.20000	0.4207403	0.5792597	0.30000	0.61791	0.38209
-0.69000	0.245097	0.754903	-0.19000	0.4246546	0.5753454	0.31000	0.62172	0.37828
-0.68000	0.2482522	0.7517478	-0.18000	0.4285763	0.5714237	0.32000	0.62552	0.37448
-0.67000	0.2514288	0.7485712	-0.17000	0.4325051	0.5674949	0.33000	0.62930	0.37070
-0.66000	0.2546268	0.7453732	-0.16000	0.4364405	0.5635595	0.34000	0.63307	0.36693
-0.65000	0.257846	0.742154	-0.15000	0.4403823	0.5596177	0.35000	0.63683	0.36317
-0.64000	0.2610862	0.7389138	-0.14000	0.44433	0.55567	0.36000	0.64058	0.35942
-0.63000	0.2643472	0.7356528	-0.13000	0.4482832	0.5517168	0.37000	0.64431	0.35569
-0.62000	0.2676288	0.7323712	-0.12000	0.4522415	0.5477585	0.38000	0.64803	0.35197
-0.61000	0.2709308	0.7290692	-0.11000	0.4562046	0.5437954	0.39000	0.65173	0.34827
-0.60000	0.2742531	0.7257469	-0.10000	0.4601721	0.5398279	0.40000	0.65542	0.34458
-0.59000	0.2775953	0.7224047	-0.09000	0.4641435	0.5358565	0.41000	0.65910	0.34090
-0.58000	0.2809573	0.7190427	-0.08000	0.4681186	0.5318814	0.42000	0.66276	0.33724
-0.57000	0.2843388	0.7156612	-0.07000	0.4720968	0.5279032	0.43000	0.66640	0.33360
-0.56000	0.2877397	0.7122603	-0.06000	0.4760777	0.5239223	0.44000	0.67003	0.32997
-0.55000	0.2911597	0.7088403	-0.05000	0.4800611	0.5199389	0.45000	0.67364	0.32636
-0.54000	0.2945985	0.7054015	-0.04000	0.4840465	0.5159535	0.46000	0.67724	0.32276

continued

z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$
0.47000	0.68082	0.31918	0.97000	0.83398	0.16602	1.47000	0.92922	0.07078
0.48000	0.68439	0.31561	0.98000	0.83646	0.16354	1.48000	0.93056	0.06944
0.49000	0.68793	0.31207	0.99000	0.83891	0.16109	1.49000	0.93189	0.06811
0.50000	0.69146	0.30854	1.00000	0.84134	0.15866	1.50000	0.93319	0.06681
0.51000	0.69497	0.30503	1.01000	0.84375	0.15625	1.51000	0.93448	0.06552
0.52000	0.69847	0.30153	1.02000	0.84614	0.15386	1.52000	0.93574	0.06426
0.53000	0.70194	0.29806	1.03000	0.84849	0.15151	1.53000	0.93699	0.06301
0.54000	0.70540	0.29460	1.04000	0.85083	0.14917	1.54000	0.93822	0.06178
0.55000	0.70884	0.29116	1.05000	0.85314	0.14686	1.55000	0.93943	0.06057
0.56000	0.71226	0.28774	1.06000	0.85543	0.14457	1.56000	0.94062	0.05938
0.57000	0.71566	0.28434	1.07000	0.85769	0.14231	1.57000	0.94179	0.05821
0.58000	0.71904	0.28096	1.08000	0.85993	0.14007	1.58000	0.94295	0.05705
0.59000	0.72240	0.27760	1.09000	0.86214	0.13786	1.59000	0.94408	0.05592
0.60000	0.72575	0.27425	1.10000	0.86433	0.13567	1.60000	0.94520	0.05480
0.61000	0.72907	0.27093	1.11000	0.86650	0.13350	1.61000	0.94630	0.05370
0.62000	0.73237	0.26763	1.12000	0.86864	0.13136	1.62000	0.94738	0.05262
0.63000	0.73565	0.26435	1.13000	0.87076	0.12924	1.63000	0.94845	0.05155
0.64000	0.73891	0.26109	1.14000	0.87286	0.12714	1.64000	0.94950	0.05050
0.65000	0.74215	0.25785	1.15000	0.87493	0.12507	1.65000	0.95053	0.04947
0.66000	0.74537	0.25463	1.16000	0.87698	0.12302	1.66000	0.95154	0.04846
0.67000	0.74857	0.25143	1.17000	0.87900	0.12100	1.67000	0.95254	0.04746
0.68000	0.75175	0.24825	1.18000	0.88100	0.11900	1.68000	0.95352	0.04648
0.69000	0.75490	0.24510	1.19000	0.88298	0.11702	1.69000	0.95449	0.04551
0.70000	0.75804	0.24196	1.20000	0.88493	0.11507	1.70000	0.95543	0.04457
0.71000	0.76115	0.23885	1.21000	0.88686	0.11314	1.71000	0.95637	0.04363
0.72000	0.76424	0.23576	1.22000	0.88877	0.11123	1.72000	0.95728	0.04272
0.73000	0.76730	0.23270	1.23000	0.89065	0.10935	1.73000	0.95818	0.04182
0.74000	0.77035	0.22965	1.24000	0.89251	0.10749	1.74000	0.95907	0.04093
0.75000	0.77337	0.22663	1.25000	0.89435	0.10565	1.75000	0.95994	0.04006
0.76000	0.77637	0.22363	1.26000	0.89617	0.10383	1.76000	0.96080	0.03920
0.77000	0.77935	0.22065	1.27000	0.89796	0.10204	1.77000	0.96164	0.03836
0.78000	0.78230	0.21770	1.28000	0.89973	0.10027	1.78000	0.96246	0.03754
0.79000	0.78524	0.21476	1.29000	0.90147	0.09853	1.79000	0.96327	0.03673
0.80000	0.78814	0.21186	1.30000	0.90320	0.09680	1.80000	0.96407	0.03593
0.81000	0.79103	0.20897	1.31000	0.90490	0.09510	1.81000	0.96485	0.03515
0.82000	0.79389	0.20611	1.32000	0.90658	0.09342	1.82000	0.96562	0.03438
0.83000	0.79673	0.20327	1.33000	0.90824	0.09176	1.83000	0.96638	0.03362
0.84000	0.79955	0.20045	1.34000	0.90988	0.09012	1.84000	0.96712	0.03288
0.85000	0.80234	0.19766	1.35000	0.91149	0.08851	1.85000	0.96784	0.03216
0.86000	0.80511	0.19489	1.36000	0.91308	0.08692	1.86000	0.96856	0.03144
0.87000	0.80785	0.19215	1.37000	0.91466	0.08534	1.87000	0.96926	0.03074
0.88000	0.81057	0.18943	1.38000	0.91621	0.08379	1.88000	0.96995	0.03005
0.89000	0.81327	0.18673	1.39000	0.91774	0.08226	1.89000	0.97062	0.02938
0.90000	0.81594	0.18406	1.40000	0.91924	0.08076	1.90000	0.97128	0.02872
0.91000	0.81859	0.18141	1.41000	0.92073	0.07927	1.91000	0.97193	0.02807
0.92000	0.82121	0.17879	1.42000	0.92220	0.07780	1.92000	0.97257	0.02743
0.93000	0.82381	0.17619	1.43000	0.92364	0.07636	1.93000	0.97320	0.02680
0.94000	0.82639	0.17361	1.44000	0.92507	0.07493	1.94000	0.97381	0.02619
0.95000	0.82894	0.17106	1.45000	0.92647	0.07353	1.95000	0.97441	0.02559
0.96000	0.83147	0.16853	1.46000	0.92785	0.07215	1.96000	0.97500	0.02500

continued

z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	$1-\Phi(z)$
1.97000	0.97558	0.02442	2.47000	0.99324	0.00676	2.97000	0.99851	0.00149
1.98000	0.97615	0.02385	2.48000	0.99343	0.00657	2.98000	0.99856	0.00144
1.99000	0.97670	0.02330	2.49000	0.99361	0.00639	2.99000	0.99861	0.00139
2.00000	0.97725	0.02275	2.50000	0.99379	0.00621	3.00000	0.99865	0.00135
2.01000	0.97778	0.02222	2.51000	0.99396	0.00604	3.01000	0.99869	0.00131
2.02000	0.97831	0.02169	2.52000	0.99413	0.00587	3.02000	0.99874	0.00126
2.03000	0.97882	0.02118	2.53000	0.99430	0.00570	3.03000	0.99878	0.00122
2.04000	0.97932	0.02068	2.54000	0.99446	0.00554	3.04000	0.99882	0.00118
2.05000	0.97982	0.02018	2.55000	0.99461	0.00539	3.05000	0.99886	0.00114
2.06000	0.98030	0.01970	2.56000	0.99477	0.00523	3.06000	0.99889	0.00111
2.07000	0.98077	0.01923	2.57000	0.99492	0.00508	3.07000	0.99893	0.00107
2.08000	0.98124	0.01876	2.58000	0.99506	0.00494	3.08000	0.99896	0.00104
2.09000	0.98169	0.01831	2.59000	0.99520	0.00480	3.09000	0.99900	0.00100
2.10000	0.98214	0.01786	2.60000	0.99534	0.00466	3.10000	0.99903	0.00097
2.11000	0.98257	0.01743	2.61000	0.99547	0.00453	3.11000	0.99906	0.00094
2.12000	0.98300	0.01700	2.62000	0.99560	0.00440	3.12000	0.99910	0.00090
2.13000	0.98341	0.01659	2.63000	0.99573	0.00427	3.13000	0.99913	0.00087
2.14000	0.98382	0.01618	2.64000	0.99585	0.00415	3.14000	0.99916	0.00084
2.15000	0.98422	0.01578	2.65000	0.99598	0.00402	3.15000	0.99918	0.00082
2.16000	0.98461	0.01539	2.66000	0.99609	0.00391	3.16000	0.99921	0.00079
2.17000	0.98500	0.01500	2.67000	0.99621	0.00379	3.17000	0.99924	0.00076
2.18000	0.98537	0.01463	2.68000	0.99632	0.00368	3.18000	0.99926	0.00074
2.19000	0.98574	0.01426	2.69000	0.99643	0.00357	3.19000	0.99929	0.00071
2.20000	0.98610	0.01390	2.70000	0.99653	0.00347	3.20000	0.99931	0.00069
2.21000	0.98645	0.01355	2.71000	0.99664	0.00336	3.21000	0.99934	0.00066
2.22000	0.98679	0.01321	2.72000	0.99674	0.00326	3.22000	0.99936	0.00064
2.23000	0.98713	0.01287	2.73000	0.99683	0.00317	3.23000	0.99938	0.00062
2.24000	0.98745	0.01255	2.74000	0.99693	0.00307	3.24000	0.99940	0.00060
2.25000	0.98778	0.01222	2.75000	0.99702	0.00298	3.25000	0.99942	0.00058
2.26000	0.98809	0.01191	2.76000	0.99711	0.00289	3.26000	0.99944	0.00056
2.27000	0.98840	0.01160	2.77000	0.99720	0.00280	3.27000	0.99946	0.00054
2.28000	0.98870	0.01130	2.78000	0.99728	0.00272	3.28000	0.99948	0.00052
2.29000	0.98899	0.01101	2.79000	0.99736	0.00264	3.29000	0.99950	0.00050
2.30000	0.98928	0.01072	2.80000	0.99744	0.00256	3.30000	0.99952	0.00048
2.31000	0.98956	0.01044	2.81000	0.99752	0.00248	3.31000	0.99953	0.00047
2.32000	0.98983	0.01017	2.82000	0.99760	0.00240	3.32000	0.99955	0.00045
2.33000	0.99010	0.00990	2.83000	0.99767	0.00233	3.33000	0.99957	0.00043
2.34000	0.99036	0.00964	2.84000	0.99774	0.00226	3.34000	0.99958	0.00042
2.35000	0.99061	0.00939	2.85000	0.99781	0.00219	3.35000	0.99960	0.00040
2.36000	0.99086	0.00914	2.86000	0.99788	0.00212	3.36000	0.99961	0.00039
2.37000	0.99111	0.00889	2.87000	0.99795	0.00205	3.37000	0.99962	0.00038
2.38000	0.99134	0.00866	2.88000	0.99801	0.00199	3.38000	0.99964	0.00036
2.39000	0.99158	0.00842	2.89000	0.99807	0.00193	3.39000	0.99965	0.00035
2.40000	0.99180	0.00820	2.90000	0.99813	0.00187	3.40000	0.99966	0.00034
2.41000	0.99202	0.00798	2.91000	0.99819	0.00181	3.41000	0.99968	0.00032
2.42000	0.99224	0.00776	2.92000	0.99825	0.00175	3.42000	0.99969	0.00031
2.43000	0.99245	0.00755	2.93000	0.99831	0.00169	3.43000	0.99970	0.00030
2.44000	0.99266	0.00734	2.94000	0.99836	0.00164	3.44000	0.99971	0.00029
2.45000	0.99286	0.00714	2.95000	0.99841	0.00159	3.45000	0.99972	0.00028
2.46000	0.99305	0.00695	2.96000	0.99846	0.00154	3.46000	0.99973	0.00027

LAMPIRAN B : *THE STANDARD REPORT OF LOPA (IEC 61511)*

Impact event Description	Severity level	Initiating Cause	Initiation Cause Likelihood (ICL) (event per year)	General Process Design	BPCS	Alarms , Etc.	Additional Mitigation, Restricted Access	Additional Mitigations, Dike (Bunds), PRV	Intermediate Event Likelihood (IEL=ICLx PFDx...x PFDn) (Event per year)	Target Mitigated Event Likelihood (TMEL)	PFD avg = TMEL : IEL _t	SIL determined by ratio of TMEL and IEL
105-JT overspeed - High Vibration - Internal Damage - plant trip and shutdown	CE	more flow steam	0,7	0,1	0,1	0,1	0,5	0,01	0,0000035	0,00001	2,85714	NR
lack of steam in to 105-JT - Low Speed - Low power Turbine - Low Power Compressor - Low Pressure on Discharge compressor	CE	less flow steam or failed to open	0,7	0,1	0,1	1	0,5	0,01	0,000035	0,00001	0,28571	SIL 0
high vibration and high temperature occurred on 105-JT, and caused the other mechanical damage	CE	nozzle aus	1,2	0,1	1	1	0,5	0,01	0,0006	0,00001	0,01667	SIL 1
	CE	bearing aus	1,4	0,1	1	1	0,5	0,01	0,0007	0,00001	0,01429	SIL 1